



Studijní program N 2301 – Strojírenství

Materiály a technologie
Zaměření strojírenská metalurgie

Vliv technologických parametrů výroby voskových modelů na rozměrovou přesnost odlitků

Influence of technological parameters of wax models production on the dimensional precision of castings

Bc. Adam Černochoch
KSP – SM – 570

Vedoucí diplomové práce:
Konzultant diplomové práce:

Prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 72
Počet tabulek: 21
Počet obrázků: 53
Počet grafů: 8
Počet příloh: 7

Datum: 24.5.2013



ZADÁNÍ

A N O T A C E
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: N2301 – Strojírenství
Student: Bc. Adam Černoch
Téma práce: Vliv technologických parametrů výroby voskových modelů na rozměrovou přesnost odlitků

Influence of technological parameters of wax models production on the dimensional precision of castings

Číslo DP: KSP – SM – 570
Vedoucí DP: prof. Ing. Iva Nová, CSc. - *TU v Liberci*
Konzultant DP: Ing. Jiří Machuta, Ph.D. - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá technologickými parametry při výrobě voskových modelů a jejich vlivem na rozměrovou přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu. Úvodní teoretická část je věnována technologii výroby přesně litých odlitků na vytavitelný model, voskům používaných při této metodě a kontrolním metodám, které se používají při výrobě přesně litých odlitků. V následující praktické části je pozornost nejprve věnována stanovení deformačních charakteristik soustavy vosk – kov a dále parametrům ovlivňující kvalitu voskového modelu a současně tak i tvarovou a rozměrovou přesnost vlastních odlitků.

Abstract:

This thesis deals with technological parameters by production of wax models and their influence on the dimensional precision castings manufacturing by the lost wax method.

The theoretical part focuses mainly on production technology of precision castings by the lost wax method, on wax used in this method and on the control methods that are used by manufacturing of precision castings.

The following practical part pays attention first to the determination of deformation characteristics of the wax - metal and the parameters affecting the quality of the wax model and at the same time the shape and dimensional precision of its castings.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....

Bc. Adam Černoch

Barákova 563

506 01 Jičín

Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval spolupracujícímu podniku Prague Casting Services a.s. a jejich zaměstnancům, Ing. Karlu Kotkovi a Jiřímu Kočovskému za mnoho cenných a odborných konzultací a připomínek zejména z jejich dlouholeté praxe, bez kterých by tato práce nevznikla. V neposlední řadě bych také velmi rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za bezpočet rad a odborné vedení.



OBSAH

1. ÚVOD	9
2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE.....	10
2.1 ÚVOD DO TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL	10
2.1.1 Historie přesného lití [6]	10
2.2 POPIS METODY LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL [3]	11
2.2.1 Princip metody přesného lití [3]	12
2.2.1.1 Výroba formy pro voskové modely	13
2.2.1.2 Výroba voskových modelů – vstřikováním do kovové formy	14
2.2.1.3 Sestavování modelů do stromečků	15
2.2.1.4 Výroba keramické skořepiny	15
2.2.1.5 Vytavování voskových modelů [18]	16
2.2.1.6 Vypalování skořepin [3], [9]	17
2.2.1.7 Tavení a odlévání	18
2.2.1.8 Dokončovací operace	18
2.2.1.9 Konečná kontrola odlitků	20
2.3 PŘEHLED VOSKOVÝCH HMOT POUŽÍVANÝCH METODOU PŘESNÉHO LITÍ [3], [6]	20
2.4 VLASTNOSTI VOSKŮ PRO METODU PŘESNÉHO LITÍ [7]	22
2.4.1 Mechanické vlastnosti vosků [7]	22
2.4.2 Fyzikální vlastnosti vosků [7]	24
2.5 POPIS KONTROLNÍCH METOD POUŽÍVANÝCH PŘI PŘESNÉM LITÍ [1], [3]	27
2.5.1 Vizualní kontrola [1], [3]	28
2.5.2 Rozměrová kontrola [1], [3], [8], [15], [16]	28
2.5.3 Kontrola vnitřní jakosti (destruktivní či nedestruktivní metody) [1], [3]	29
2.5.4 Kontrola vlastností (destruktivní či nedestruktivní metody) [1], [3]	30
2.6 NÁVRH A VÝROBA TEPELNÉHO ŠTÍTU PRO PLYNOVÉ TURBÍNY VE SLÉVÁRNĚ PRAGUE CASTING SERVICES A.S. [8], [9]	31
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE [8], [9]	38
3.1 PŘEHLED VŠECH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ OVLIVŇUJÍCÍCH KVALITU VOSKOVÉHO MODELU, TVAROVOU A ROZMĚROVOU PŘESNOST	38
3.2 DEFORMACE VOSKOVÝCH MODELŮ A JEJÍ ELIMINACE [8], [9]	41
3.3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ HLAVNÍCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ PŘI VÝROBĚ VOSKOVÉHO MODELU NA KONEČNOU PŘESNOST ODLITKŮ [8], [9]	43



3.3.1 Lisování vlastního voskového modelu – tepelného štítu a zjištění závislosti vosk – kov [8], [9]	44
3.3.2 Stanovení deformačních charakteristik VOSK – KOV [8], [9]	47
3.3.3 Lisování a chlazení voskových modelů při odlišných technologických parametrech [8], [9]	51
3.3.3.1 Čas vstřikování	51
3.3.3.2 Čas dotlaku	52
3.3.3.3 Čas chlazení vosku ve fixačním přípravku	53
3.3.3.4 Teplota chladicí vody, do které se vkládá fixační přípravek	54
3.3.3.5 Vstřikovací tlak	55
3.3.3.6 Teplota vstřikovací trysky	56
3.3.3.7 Teplota trysky a vstřikovací tlak	57
3.4 3D MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ ATOS COMPACT SCAN V PRAXI [8], [9], [15], [16]	58
3.4.1 Princip a použití 3D skeneru	59
3.4.2 Skenování voskového modelu a kovového dílu [8], [9], [15], [16]	60
3.4.3 Vyhodnocování výsledků v programu ATOS GOM INSPECT Professional [8], [9], [15], [16]	62
3.4.4 Výhody 3D skeneru oproti souřadnicovému systému [8], [9], [15], [16]	62
4. ZHODNOCENÍ – DISKUZE	63
5. ZÁVĚR	64
6. SEZNAMY	66
6.1 SEZNAM OBRÁZKŮ	66
6.2 SEZNAM GRAFŮ	67
6.3 SEZNAM TABULEK	68
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
8. PŘÍLOHY	70

1. ÚVOD

Technologie přesného lití neboli „lost wax“ či „investment casting“ je v dnešní době ve strojírenství poměrně velmi důležitá technologie, neboť jde o výrobu přesných odlitků (často zmiňována jako metoda „near-net-shape“¹), které se svým tvarem a přesností přibližují už téměř hotovým výrobkům. Tím se ušetří poměrně velké náklady a čas na následné obrábění (zejména při výrobě odlitků z drahých kovů dokážeme ušetřit nemalé náklady na materiálu). Finální odlitky jsou tedy levnější a hlavně rychleji doručeny svým cílovým zákazníkům.

Tato technologie zažívá v dnešní době progres nejen díky své rychlosti výroby, ale v neposlední řadě i vysoké rozměrové a tvarové přesnosti, vnitřní jakosti a dobré kvalitě odlévaných povrchů. Z těchto důvodů je tato technologie předurčena pro rapidní nárůst výroby přesných odlitků a to nejen v energetice a letecké dopravě, ale i v automobilovém a civilním průmyslu.

Výrobou přesných odlitků, odlévaných metodou na vytavitelný model, se dlouhodobě zabývají i pracovníci a učitelé na KSP – FS, Technické univerzitě v Liberci.

Též já se ve své diplomové práci věnuji specifikám při výrobě odlitků na vytavitelný model, resp. hlavním technologickým parametrům, které do procesu vstupují při výrobě samotného voskového modelu a ovlivňují rozměrovou a tvarovou přesnost odlitků vyrobených přesným litím. Tyto parametry budu sledovat při výrobě tepelného štítu „heat shield“, který je součástí spalovací komory v pozemní plynové turbíně. Samotná výroba jednotlivého dílu s sebou přináší několik důležitých kroků, tak, jak je obsaženo v rešeršní části této práce.

Diplomová práce byla napsána s podporou SGS 28005

¹ Metoda přesného lití se řadí mezi technologie „Near-net-shape“ neboli „produkty blízké hotovým výrobkům“ – při které dochází k eliminování nákladů na obrábění a získání úspor na drahém přídavkovém materiálu.



2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

2.1 ÚVOD DO TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

2.1.1 Historie přesného lití [6]

První zmínky přesného lití se objevují již několik tisíc let před našim letopočtem, kdy byla nalezena v Indii bronzová figurka tanečnice viz obr.1. Další nálezy pocházejí z období dávné civilizace v Mezopotámii, Řecku, Římě, ale také na dálném východě. Ve všech případech se tato metoda využívala na výrobu uměleckých předmětů tj. sošek, šperků a masek. Princip první výroby odlitku na vytavitelný model spočíval v nanesení hlíny na voskový model ze včelího vosku. Do takto vyrobených forem se nejčastěji odlévaly bronz a drahé kovy.

První zmínky přesného lití na našem území pocházejí dle historických pramenů už z doby bronzové, přibližně z období 1300 př. n. l. S touto dobou jsou spojovány první nálezy hliněných skořepin, které byly nalezeny v okolí Brněnska. Jednou z nejznámějších památek odlitých metodou na vytavitelný model je bronzová soška býčka z období (700 – 450 př. n. l.) viz obr. 2, soška byla objevena v jeskyni Býčí Skála u Adamova. V devatenáctém století n. l. se výroba odlitků na vytavitelný model používala minimálně, neboť se pro výrobu odlitků používaly výhradně pískové, dělené formy. Metoda je znovu opět používána až na konci devatenáctého století pro farmaceutické účely. Rozmach této metodě dává až druhá světová válka, kdy byl včelí vosk nahrazen moderními vosky a hliněné skořepiny byly nahrazeny samonosnými, vysoko pevnostními skořepinami. V dnešní době jsou odlitky vyráběné přesným litím řazeny k vysoce přesným a především tvarově náročným dílům. Z tohoto hlediska můžeme říci, že tato technologie dosáhla vysokého progresu a vývoje a je dnes právem řazena mezi high technologie výroby odlitků.





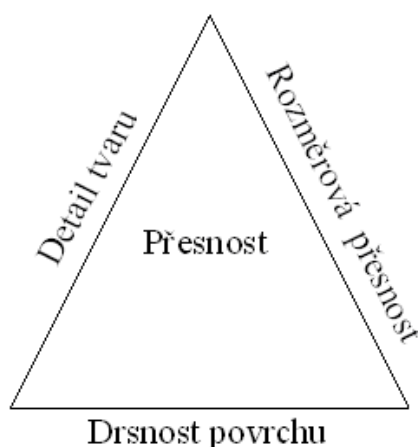
Obr. 1 Bronzová figura tanečnice (Indie ~3000 př.n.l.) [4]



Obr. 2 Bronzová soška býčka, z období (700 – 450 př. n. l.), [5]

2.2 POPIS METODY LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL [3]

Metodu přesného lití můžeme nazvat technologií, která umožňuje vyrobit tvarově složité avšak velmi přesné součásti. Pojmem přesná součást rozumíme takovou, kdy je 90% procent vyrobených ploch vyrobeno načisto tj. s dostatečnou rozměrovou přesností a tedy není zapotřebí použití dokončovacích operací (broušení, obrábění). Spojením přesnosti odlitků, kvality povrchu a tvarové náročnosti odlitků se získají tři aspekty, které jsou navzájem propojeny, a poukazuje na ně obr. 3.

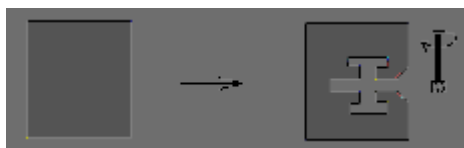


Obr. 3 Aspekty přesnosti u odlitku [3]

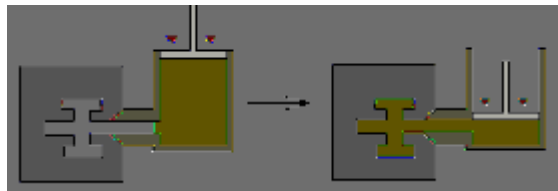


2.2.1 Princip metody přesného lití [3]

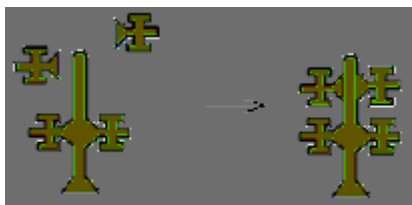
Na následujícím obr. 4 je znázorněn průběh celé metody přesného lití. Od samotné výroby kovové či hliníkové formy po výrobu voskového modelu až po sestavení voskového stromečku a obalení stromečku přes vytavení stromečku. V závěrečné části je znázorněno lití stromečku a jako poslední operace následuje rozměrová a jakostní RTG² kontrola.



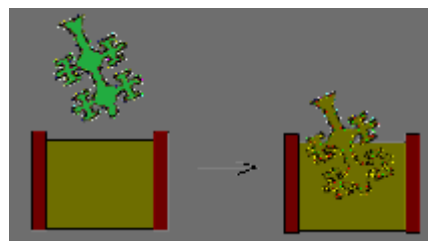
1) Výroba formy pro voskové modely



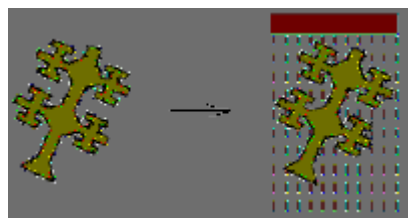
2) Výroba voskového modelu na vstřikolisu



3) Sestavení voskového stromečku



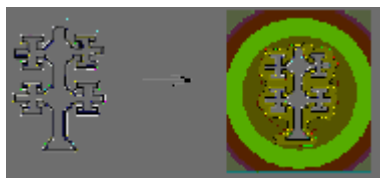
4) Výroba keramické skořepiny – máčením v příslušných obalovacích břečkách



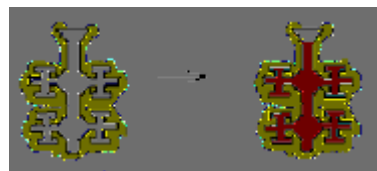
5) Výroba keramické skořepiny – posypáváním obalovacím materiálem



6) Vytavení keramické formy v autoklávu



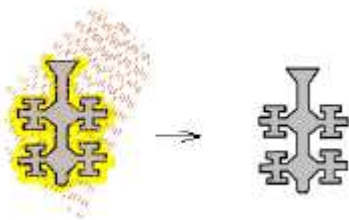
7) Výpal ker. skořepin



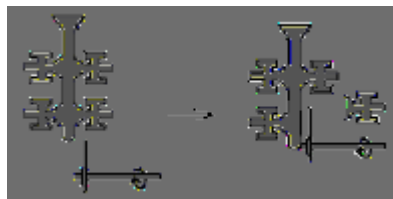
8) Přehřev ker. skořepin a lití

² RTG – Roentgenová defektoskopická zkouška

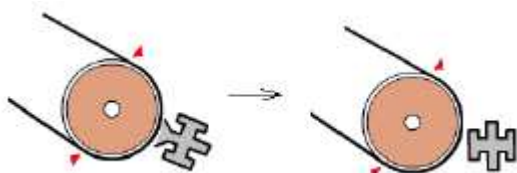




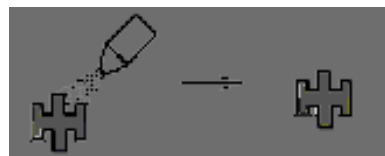
9) Odstranění keramiky



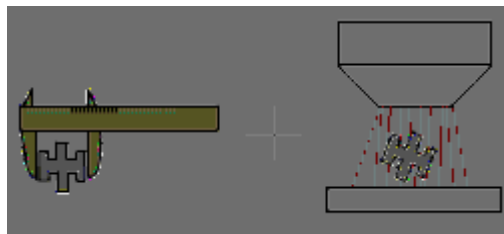
10) Odřezání odlitků z vtokové soustavy



11) Broušení vtoků – zářezů



12) Dokončovací operace – tryskání, cídění, leštění



13) Kontrola hotových dílů – rozměrová, BLD, RTG

Obr. 4 Schéma výroby odlitků metodou na vytavitelný model [3]

2.2.1.1 Výroba formy pro voskové modely

Výroba formy, která následně slouží pro výrobu voskového modelu je první operací v technologickém sledu výroby přesných odlitků. Pro výrobu kvalitních odlitků je zapotřebí kvalitních voskových modelů a pro kvalitní model je zapotřebí kvalitních a vysoce přesných nejčastěji kovových forem. Ty jsou vyráběny třískovým obráběním na pěti osých obráběcích centrech. Jelikož tvary odlitků pro přesné lití jsou velice složité, tudíž nároky kladené na výrobu forem a jejich konstrukci jsou vysoké. Tvar budoucí dutiny je shodný s tvarem budoucí součásti. Jedním z nejdůležitějších faktorů při výrobě dutiny v kovové formě je volba smrštění, které vzniká při tuhnutí kovu, ale také při tuhnutí voskového modelu. Dutina tedy musí být zvětšena o tyto dvě smrštění, které se obecně stanovuje na hodnotu 2,9%.



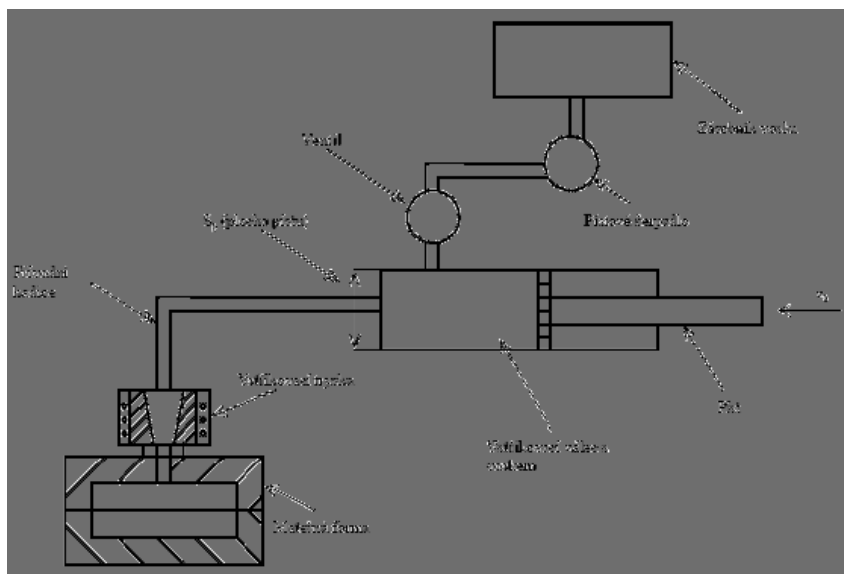
Formy sloužící pro výrobu voskových modelů musí splňovat následující požadavky: umožnit výrobu kvalitních zdravých modelů s bezvadným povrchem, bez staženin, vzduchových bublin, propadlin a ostatních povrchových vad a požadovanou přesností rozměrů.

Před samotnou výrobou formy by měly být stanoveny následující parametry:

- Odhadovaný celkový počet kusů
- Počet kusů v dávce
- Koncové použití odlitku
- Požadavky na kvalitu odlitku

2.2.1.2 Výroba voskových modelů – vstřikováním do kovové formy

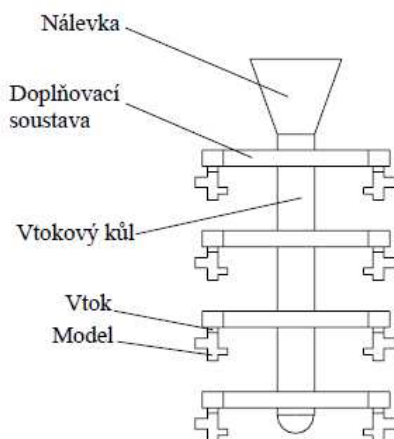
Výroba voskového modelu tzv. vstřikováním vosku do kovové formy bývá ve slévárnách prvním krokem ve výrobě přesného odlitku na vytavitelný model. Kovové formy jsou vyráběny v profesionálních nástrojárnách. Vstřikování se provádí na vstřikolisech, kde se pod tlakem vstřikují speciální roztavené nízkotavitelné vosky, aby následně při vytavení rychle vytekly z dutiny keramické formy a neporušily ji. Základní schéma vstřikolisu je znázorněno na obr. 5. Teplota vosků při vstřikování se pohybuje v rozmezí 60 – 90°C. Po ztuhnutí vosku je model vyjmut z dutiny formy. Pokud je model v předem stanovených rozměrech a neobsahuje viditelné povrchové vady (tj. bubliny, nečistoty, staženiny), je podstoupen na další operaci.



Obr. 5 Schéma vstříkolisu pro výrobu voskových modelů [3]

2.2.1.3 Sestavování modelů do stromečků

Odstříknuté voskové modely zbavené voskové vtokové soustavy se musí přilepit na voskovou vtokovou soustavu tzv. *stromeček*. Jednotlivé části stromečku jsou zobrazeny na obr. 6. Stromečky lze rozdělit podle počtu kusů dílů umístěných na soustavu. U malých odlitků se na stromeček lepí až několik desítek modelů. U větších a složitějších dílů jsou voskové stromečky pouze po jednom kusu s ohledem na zabíhavost kovu.



Obr. 6 Schéma uspořádání jednotlivých částí voskového stromečku [3]

Nejčastěji se voskové modely na voskovou soustavu připojují ručně a to lepením nebo pájením. Pro lepení se používá tavicí pistole, pomocí které se na lepené plochy nanáší roztavené lepidlo. Při pájení se používají nahřáté pájky nebo nože, které se přikládají mezi spojované plochy tj. vtok a doplňující soustavu. Tyto dvě plochy se nataví a po zatuhnutí se spojí v jednu část.

2.2.1.4 Výroba keramické skořepiny

Po sestavení voskového stromečku putuje stromeček na obalovnu, kde se vyrábí keramický povrch stromečku (budoucí keramická forma) za pomoci robotické obalovací linky, sypačů a fluidního lože. Pomocí těchto zařízení se na voskový stromeček nanáší jednotlivé vrstvy plniva a pojiva, která společně tvoří vrstvy žáruvzdorné keramické skořepiny.



Jako vrstvy plniva se používají hlavně kysličníky a křemičitany. Z kysličníků se především využívá Al_2O_3 – oxid hlinitý a ZrO_2 – oxid zirkoničitý. Z křemičitanů se nejvíce používá molochit.

Jako pojiva se dnes používají především koloidní roztoky oxidu křemičitého, dále také organické sloučeniny zirkonu a v některých případech sloučeniny anorganické. Používaná křemičitanová pojiva mají buď lihovou, nebo vodní bázi. Vodní báze se nejvíce využívá pro primární obaly neboť má delší dobu sušení a vytvrzování. Oproti tomu alkoholová báze se používá na obaly sekundární, které jsou aplikovány na robotické obalovací lince. Tato linka obsahuje současně také vytvrzovací část, ve které se působením plynného prostředí – amoniakem dosáhne téměř okamžitého vytvrzení a další obal se může nanášet během několika minut.

Pomocí několika vrstev plniva a pojiva dostáváme keramickou formu, která je schopna odolat žáruvzdorným teplotám a umožňuje nám odlévat vysokotavitelné materiály.

2.2.1.5 Vytavování voskových modelů [18]

Dalším krokem po dokončení výroby keramické skořepiny a jejím dostatečném vysušení je vytavení vosku z keramické formy. Pro vytavení vosku se v současnosti nejvíce používá speciální zařízení boilerkláv nebo také autokláv viz obr. 7.

Autokláv je tlaková nádoba s vyvíječem přehřáté páry, kde se během patnácti až dvaceti minutového cyklu teplotním šokem vytaví vosk z keramické formy. Skořepiny se do zařízení zaváží na speciálně upraveném vozíku, na který jsou umísťovány tak, aby z nich vosk volně vytékal. Ukázka zavežených skořepin v autoklávu je na obr. 8. Vytavený vosk se zachytává ve sběrné nádobě pod autoklávem a po regeneraci lze opět použít. U zařízení je nutné sledovat hodnoty náběhu, neboť pokud by došlo k pomalému náběhu cyklu, keramická skořepina by mohla popraskat vlivem teplotní roztažnosti vosku. Časová hodnota náběhu autoklávu na požadovaný tlak 0,3 - 0,7 MPa a teplotu páry kolem 130 - 170°C se pohybuje u moderních autoklávů kolem 4-5 sekund.

Značnou výhodou tohoto způsobu odstraňování voskových modelů jsou menší ztráty na modelovém vosku, minimální množství popraskaných skořepin, které se následně musí opravovat a možnost pracovat s tenčími skořepinami.





Obr. 7 Ukázka moderního autoklávu od firmy LBBC [18]



Obr. 8 Zavežené skořepiny do autoklávu [17]

2.2.1.6 Vypalování skořepin [3], [9]

Dalším procesem je výpal skořepin v elektrických odporových pecích, do kterých se zavázejí již vytavené keramické formy obr. 9. K vypalování skořepin se přistupuje z následujících důvodů:

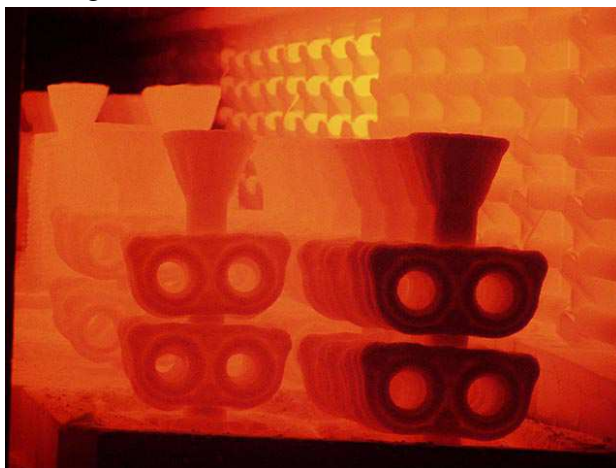
- odstranění zbytků voskových materiálů z dutiny keramické formy
- zhutnění struktury keramiky – pro dosažení potřebné pevnosti
- předehřev formy před litím

K odstranění zbytku vosku dochází již při teplotě 100 °C, ale k odstranění vody obsažené v gelové struktuře křemičitého pojiva je zapotřebí teplota okolo 1000 °C.

Dalším důvodem, proč se vypalování keramické formy provádí, je převedení amorfní formy vazné vrstvy SiO_2 – oxidu křemičitého na formu krystalickou – zhutnění struktury keramiky.

První výpal se provádí při teplotách okolo 800 °C a času okolo 2 hodin a dochází při něm k rychlému odstranění zbytků. Druhý výpal o vysoké teplotě se provádí bezprostředně před litím, kdy se forma předehřívá na teplotu 950 – 1100 °C. Při požadavku usměrněného tuhnutí kovu se používají vypalovací teploty dosahující až na teplotu 1500 °C. Vypalovací teplota je limitována teplotou tavení křemičitanu (1550 °C).





Obr. 9 Výpal skořepin [17]

2.2.1.7 Tavení a odlévání

Odlévání do křemenných forem se vždy provádí do předehřáté formy. To z důvodu lepší zabíhavosti kovu a zmírnění teplotního šoku, tím se omezí vznik vnitřních pnutí a zabrání prasknutí formy. Před odléváním se do dutiny skořepin vkládají předehřáté keramické filtry, které zachycují drobné nečistoty v roztaveném kovu. Ve slévárnách přesného lití se nejčastěji používají elektrické indukční pece. Tavení a následné odlévání se provádí v atmosféře nebo ve vakuových pecích podle typu odlévané slitiny. Ve vakuových pecích se odlévají zejména speciální niklové a kobaltové superslitiny, které mají vysoký podíl legujících prvků - vysokolegované materiály.

2.2.1.8 Dokončovací operace

Proto, aby se finální odlitek mohl poslat zákazníkovi, je třeba provést celou řadu dokončujících operací, které jsou řazeny mezi jedny z nejpracnějších v celé technologii výroby odlitků na vytavitelný model. Mezi tyto operace spadá:

a) Odstraňování keramiky

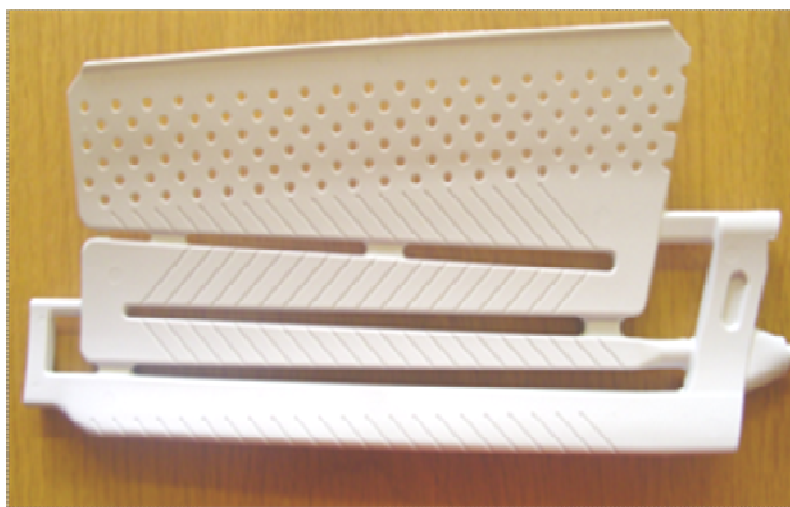
Keramiku lze z odlitků odstranit dvěma způsoby: mechanicky (tryskáním, vibrováním ve vibračním stroji) a chemicky (loužením), kdy při loužení odstraňujeme keramická jádra, která tvoří dutinu odlitků.

Nejprve se keramika odstraní tzv. nahrubo ve zvukotěsné a prachotěsné kabině, kde je umístěn vibrační stroj či vibrační kladivo. Dále se kovový stromeček



přesune do tryskacího stroje. Tryskací stroje jsou plechové boxy, ve kterých se za pomoci tlaku otryská zbylá keramika z odlitých stromečků. Jako tryskací médium se používají ocelové broky o průměrech 0,5mm. Tryskací tlak se pohybuje v rozmezí 0,2 do 5 Bar dle odlitku.

Některé odlitky mohou mít i velice složité dutiny. Ty jsou tvořeny keramickými jádry, viz obr. 10, které jsou na bázi SiO_2 . Pro louhování se tedy používají louhovací vany, ve kterých je louh na bázi Hydroxidu sodného. Pro zvýšení účinnosti louhování se louh probublává vzduchem a ohřívá na teplotu 100°C - 110°C .



Obr. 10 Keramické jádro tvořící dutinu odlitku [9]

b) Oddělování odlitků z vtokové soustavy – řezání

Pokud je stromeček zbaven keramiky, lze přistoupit k oddělení odlitků od vtokové soustavy na řezacích strojích. Používají se speciálně upravené řezací pily, které jsou opatřeny upínacími přípravky. Do těchto přípravků – svěráků se pak upínají otryskané stromečky např. za hlavní vtokovou jamku – nálevku a následně se odřezávají jednotlivé odlitky.

c) Broušení vtoků z odlitků

Tato operace se provádí na pásových bruskách, na kterých se zabrušují zbytky po nálitcích a vtokové soustavě. Tyto plochy jsou dle požadavků zákazníka buď zabrušovány do požadovaných tvarů, nebo se nechávají v požadovaných plusových hodnotách.



Brusky dělíme podle přesnosti broušení:

- Brusky pro hrubé broušení – dvoukotočová bruska, stojanová pásová bruska
- Brusky pro přesné broušení – rovinné, vodorovné, svislé, hrotové, bezhroté, planetové

Ve slévárenské praxi pro broušení vtoků se používají brusky pro hrubé broušení

2.2.1.9 Konečná kontrola odlitků

Kontrola odlitků tvoří nedílnou součást výrobního procesu. Postupy a požadavky na jakost odlitků jsou v požadavcích a specifikacích, které jsou dodané od zákazníka. Všeobecná kontrola odlitků vyrobených přesným litím zahrnuje sledování geometrie tvaru, rozměrů, vizuální kontroly (BLD) a vnitřní kvality odlitku (RTG).

Podrobný popis všech zmíněných kontrolních metod používaných při přesném lití je uveden v kapitole 2.5.

2.3 PŘEHLED VOSKOVÝCH HMOT POUŽÍVANÝCH METODOU PŘESNÉHO LITÍ [3], [6]

Voskové hmoty se používají pro výrobu voskových modelů, které se vyrábí na vstřikolisech. Vosková hmota je směs několika komponentů např.: syntetický vosk, přírodní vosk – uhlovodík, přírodní vosk – ester, přírodní a syntetická pryskyřice, montážní vosk, organické plnivo a voda, kde každá složka má jiné vlastnosti a tím lze dostat požadované voskové hmoty, která je zapotřebí pro výrobu dokonalého voskového modelu.

Pro výrobu voskových modelů se používá několik druhů voskových směsí:

- Vosky na výrobu modelů – u těchto vosků je kladen důraz na čistotu vosku a na obsah popelovin. Pokud je obsah popelovin vyšší než 0,05%, neměl by se daný vosk používat, neboť by po vypálení vosku zůstal uvnitř formy a mohly by tak vzniknout vnitřní vady v odlitcích.
 - Čisté (neplněné) vosky – jde o směs více vosků a pryskyřičných komponentů. Povrch modelů bývá často lesklý a hladký.



- Plněné vosky - obsahují kromě voskové směsi také míchané práškové plnivo, které je v základním vosku nerozpustné, to má za následek zvýšení stability směsi a snížení její kavitace. Tyto směsi jsou obvykle používány pro velmi přesné odlitky. Plnivem bývá většinou polystyren a povrch modelu je oproti emulgovaným voskům nepatrně hrubší.
- Emulgované – základní materiál je shodný jako u vosků neplněných, jsou emulgovány vodou a to až 7-12%, kdy voda částečně nahrazuje plnidlo. Dosažené povrchy vyrobených modelů jsou velmi hladké.
- Vosky na vtoky – jelikož vtoková soustava funguje jako nosný prvek voskového stromečku, je kladen důraz na vysokou pevnost vosků. Oproti voskům na výrobu modelů není zapotřebí tak vysoké čistoty. Lze používat i recyklované vosky.
- Speciální vosky
 - Adhezní – primárně slouží zejména ke spojování modelů a vtokové soustavy.
 - Namáčecí – jde o vosky, které mají vysokou tekutost, a tedy mají schopnost zaplnit otevřené spoje.
 - Opravné – dělí se na tvrdé nebo měkké a slouží k opravě poškozených modelů.
 - Vodou rozpustné – používají se k výrobě těžko přístupných dutin tam, kde by bylo složité použít jiné prostředky.



Obr. 11 Voskové směsi [3]

2.4 VLASTNOSTI VOSKŮ PRO METODU PŘESNÉHO LITÍ [7]

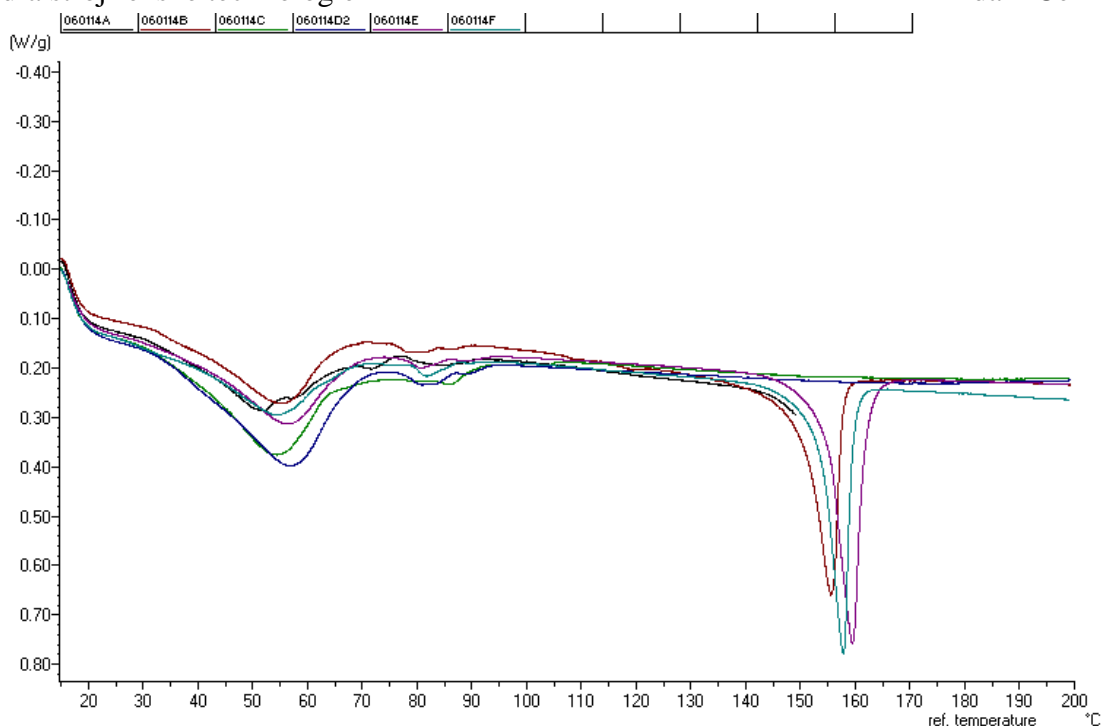
Veškeré vosky používané pro metodu přesného lití jsou komplexní směsi několika komponentů jako pryskyřic, mikrokrystallických vosků, tuhých parafinů a dalších přísad. Všechny tyto přísady ve finální směsi vosku nebo produktu hrají roli při určování výsledných vlastností. Výrobci vosku musí charakterizovat a garantovat zákazníkům právě tyto mechanické a fyzikální vlastnosti. Pokud jsou všechny vlastnosti dodrženy a vosková směs má požadovanou kvalitu, pak právě z této směsi může vzniknout dokonalý voskový model pro přesné lití.

2.4.1 Mechanické vlastnosti vosků [7]

Mechanické vlastnosti dávají voskům předpoklad pro jejich zpracování a výrobu voskových modelů pro přesné lití. Vosky jsou tvrdé, ale zároveň křehké a právě křehkost může být negativní vlastností při výrobě sestavy voskového stromečku, kdy může dojít k poškození sestavovaného stromečku. Pokud jsou vosky příliš měkké, může dojít k poškození modelů na stromečku při výrobě keramické formy a při sestavy stromečku. Ke zjištění všech těchto vlastností se používá tzv. tříbodové ohýbání. Pro tuto metodu se používají voskové zkušební tyče, buď ručně lité do kovové formy či odstříknuté na vstřikolise. Tyto tyče jsou následně ohýbané na tlakovém a tahovém stroji za daných podmínek. Veškerá data jsou počítačově zpracována a následně vyhodnocena a ukazují vlastní mechanické hodnoty vosků. Tyto mechanické hodnoty by měly být součástí každé šarže vosku.

Měření tepelného toku a teploty vosku pomocí (DSC) – křivka [7], [21] - Tato technika umožňuje uživateli sbírat informace o teplotních charakteristikách voskových směsí používaných pro výrobu voskových modelů. Jde o zkoušku, při které se měří proudění tepla dovnitř a ven ze zkoumaného vzorku při změnách teploty. Některé části zkoumaného vzorku se smísí, během testu se taví a zmrazují při různých teplotách, dochází tedy ke změnám tepelného toku s teplotou. Následně počítač vygeneruje charakteristickou křivku pro zkoušený vosk, viz obr. 12, která zobrazuje hodnoty naměřeného tepelného toku v závislosti na teplotě.

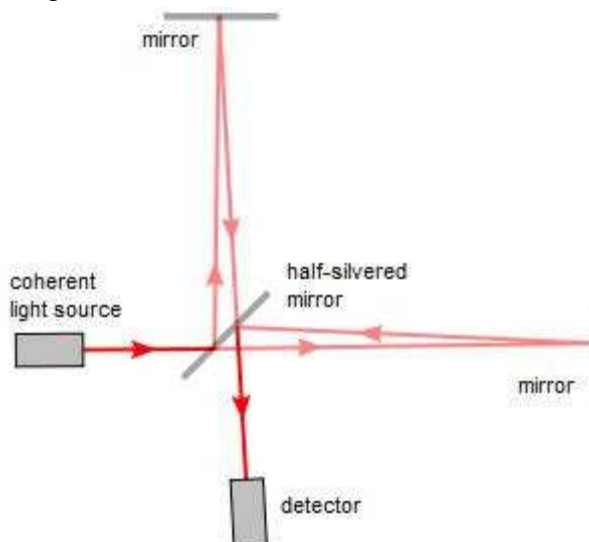




Obr. 12 Příklady DSC křivek pro různé typy vzorků [21]

Infračervená spektroskopie (FTIR) [22] - Infračervená spektroskopie (FTIR - Fourier transform infrared spectroscopy) je metoda určená především pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin. Tato technika měří absorpci infračerveného záření při průchodu měřeným vzorkem. Pro měření se používá záření o různých vlnových délkách. Výsledné infračervené spektrum je funkční závislostí energie, většinou vyjádřené v procentech transmittance (T) nebo jednotkách absorpce (A) na vlnové délce dopadajícího záření.

Průběh zkoušky je následující: Infračervené světlo svítí skrz tenkou vrstvu zkoumaného vosku. Chemické skupiny uvnitř vosku absorbují některá světla při charakteristické frekvenci. Výsledné spektrum ze směsi se porovnává se známými standardními spektry, podle čehož lze identifikovat strukturní charakteristiku voskového vzorku. Následující zkoušku lze také využívat pro určení stupně přísad - například antioxidantu a polymeru.



Obr. 13 Schéma interferometru [22]

Soudržnost břečky [7] - Voskové směsi mají rozdílné charakteristiky povrchového napětí. Dané povrchové napětí pomáhá k tomu, aby se primární břečka keramického obalu lepila na voskový model. Dobrá soudržnost primárního obalu a voskového modelu je zvláště důležitá, aby se zabránilo ohýbání, odlamování a vyboulování primárního obalu.

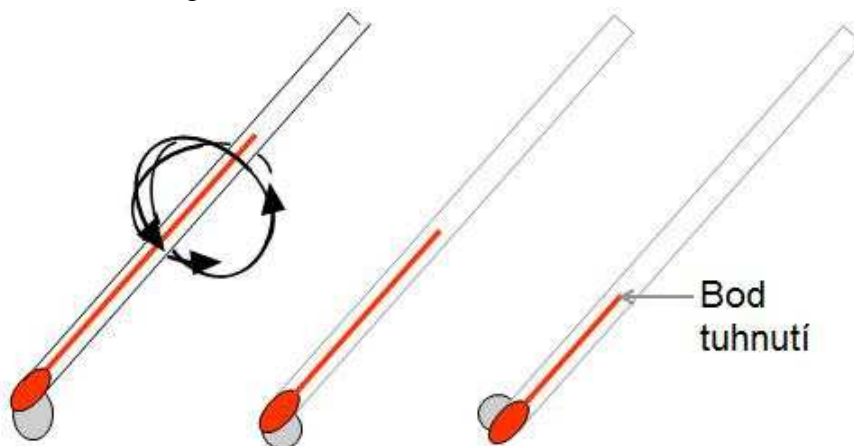
Několik činitelů jako například typ plniva, velikost zrn atd., hrají důležitou roli v soudržnosti břečky na voskový model. Test soudržnosti se provádí namáčením voskových kusů do břečky. Takto vyrobené vzorky se nechávají sušit cca 8 hodin. Po vysušení se vzorky obalí primární vrstvou keramického obalu a soudržnost je měřena v různých časech. Lepší primární soudržnost břečky vyžaduje větší sílu k jejímu rozbití.

2.4.2 Fyzikální vlastnosti vosků [7]

Bod tavení (drop melt point) - Bod tavení je definován teplotou, při které první kapka roztaveného voskového vzorku za pomalého zahřívání vyteče z pohárku. V daném pohárku je vložen testovaný vzorek v pevném stavu.

Bod tuhnutí (congealing point) - Za bod tuhnutí vosku je považována teplota, při které vosk přestane téct pod vlivem gravitace. Při této teplotě se mění skupenství vosku z plastického na pevné.





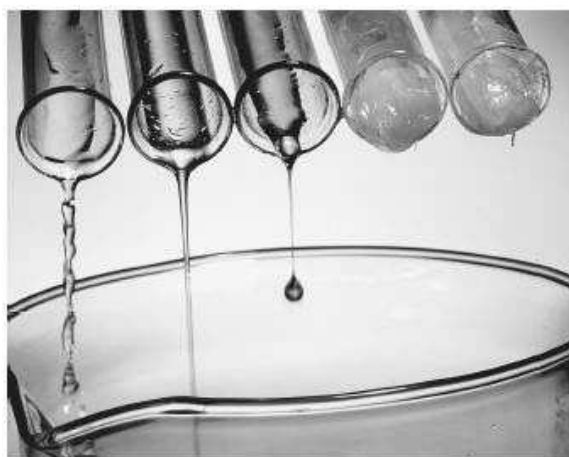
Obr. 14 Bodu tuhnutí [19]

Penetrace - Penetrace je zkouška tvrdosti vosku, při které se měří hloubka díry ve vosku od jehly. Za určitých podmínek se jehla zatíží a pronikne do měřeného vosku. Výsledek penetrace se pohybuje v desetinách milimetru. Vosk s vysokou penetrací je měkkší než vosk s menší penetrací. Zjištěná tvrdost vosku má vliv na celkovou pružnost voskových modelů.

Popelnatost - Tato metoda popisuje proceduru pro určení množství popelu ve voscích, voskových směsích, pryskyřicích a v podobných materiálech, ve kterých se popel nachází. Ten je považován za nevhodnou nečistotu. Zkouška probíhá spálením malého množství voskové směsi při teplotě kolem 700°C. Po vypálení vosku se zváží obsah popelovin, který se následně uvádí v procentech.

Určení množství vody ve vosku - Zkouška pro stanovení množství vody ve vosku se provádí pomocí tzv. vodního testu. Test se provádí užitím vlhkostního analyzáru. Průběh zkoušky je následující: malé množství vosku se umístí na váhy, které jsou uzavřeny v analyzáru vlhkosti. Zahříváním se vosk roztaví a voda obsažená ve voskové směsi se začne odpařovat. Během testu váhy neustále monitorují ztracenou váhu voskové směsi, a jakmile se hmotnost směsi ustálí, cyklus ohřívání se zastaví a zkoušku lze tak ukončit. Zaznamenaný výsledek ztracené hmotnosti se vypočítá v procentech.

Viskozita [20] - Viskozita nám udává informace o tekutosti vosku. Měření viskozity probíhá v závislosti na teplotě. Pro vstřikování a vytavování voskových modelů je důležité znát viskozitu vosku, protože poskytuje dobré zobrazení charakteristik tečení. Průběh zkoušky viskozity je následující: zkoumaný vosk se zahřeje na teplotu 80 °C. Poté se nalije do kontejneru. Ve zkušebním kontejneru se teplota dále snižuje motorem, který má konstantní hodnotu smyku. Momentový senzor měří potřebnou sílu pro udržení konstantní rychlosti motoru. Ze zkoušky je jasné, že viskozita vosku je závislá na dodaném teplu. Pokud je vosk ochlazen silou konstantní rychlosti, tak viskozita roste.



Obr. 15 Viskozita [20]

Tečení vosku při vstřikování [21] - Jde o kvantitativní metodu na určení tekutosti a proudění vosku ve chvíli, kdy se vosk vstřikuje do dutiny kovové formy. Metoda je charakteristická vstřikováním vosku do speciální spirálové formy známých parametrů (teplota, vstřikovací tlak, čas, průtoková rychlost, atd.). Značky, které jsou vyryté na kovové formě, zobrazují, jak daleko vosk dostříkl. Vosk, který je více tekutý, dosáhne většího zástříku v dutině formy. Faktory ovlivňující tečení vosku jsou: teplota vzduchu, teplota formy, teplota vosku, teplota vstřikovací trysky, geometrie dutiny formy, vstřikovací tlak a čas dotlaku, bod tuhnutí, viskozita atd.



Obr. 16 Zkouška tečení vosku [21]

2.5 POPIS KONTROLNÍCH METOD POUŽÍVANÝCH PŘI PŘESNÉM LITÍ [1], [3]

Kontrolu odlitků lze rozdělit do následujících kategorií:

1. Vizuální kontrola
2. Rozměrová kontrola
3. Kontrola vnitřní jakosti (destruktivní či nedestruktivní metody)
4. Kontrola vlastností (destruktivní či nedestruktivní metody)

Rozsah a druhy kontrol určuje zákazník už při sjednávání zakázky. Dané kontroly jsou stanoveny zákaznickými specifikacemi, které jsou dodávány společně s objednávkou. V některých případech mohou podmínky obsahovat i zvláštní požadavky např.: přípustný stupeň oduhličení povrchu, obsah plynů, předepsaný druh struktury či velikost zrna na předem daných místech.

Ve slévárnách odlitků vyráběných metodou lití na vytavitelný model se používají pro kontrolu odlitků BLD „Barevná luminiscenční defektoskopie“, RTG „Roentgenová defektoskopická zkouška“ a vizuální kontrola. Dále se na odlitcích provádí kontrola rozměrová. Veškeré výše zmíněné zkoušky se řídí předepsanými specifikacemi a výkresovou dokumentací, kterou předepisuje zákazník.

2.5.1 Vizuální kontrola [1], [3]

Jde o kontrolu, při které se kontroluje celkový tvar odlitků a povrchové vady. Odlitky s povrchovými vadami se vyřadí – jde o nezaběhlé odlitky, odlitky se zadrobeninami, zálupy, zavaleninami, staženinami, výronky a jinými, na první pohled zjevnými, vadami.

Jemné trhlinky a jiné povrchové vady okem neodhalitelné mohou být zjišťovány pomocí velkého počtu metod, jako je chemické leptání, fluorescenční kapilární metoda, zkouška vířivými proudy a magnetická zkouška (ta může odhalit vady situované přímo pod povrchem). Všechny tyto metody vyžadují pro platné výsledky čisté a relativně hladké povrchy.

Vizuální kontrola zahrnuje i kontrolu drsnosti povrchu odlitku. Pro měření drsnosti se dnes používá digitálních drsnoměrů. Dosahovaná drsnost u přesných odlitků se pohybuje kolem 2,5 – 3,2 Ra. Povrchová drsnost bývá zaznamenávána ve výkresové dokumentaci, popřípadě může být uvedena ve specifikacích pro daný odlitek.



Obr. 17 Digitální drsnoměr [17]

2.5.2 Rozměrová kontrola [1], [3], [8], [15], [16]

Rozměrová kontrola je neodmyslitelná operace při výrobě přesných odlitků, které jsou dodávány zákazníkům jako výrobky typu „near-net-shape“. Rozměrová kontrola se provádí podle technického výkresu popř. dle příslušné normy. Pro



Katedra strojírenské technologie

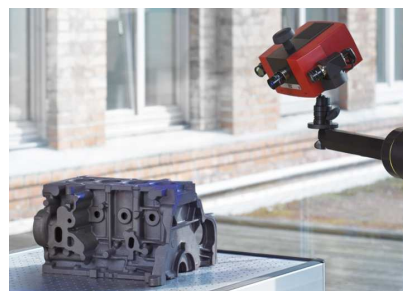
Adam Černoch

rozměrovou kontrolu lze použít několik desítek ručních měřících zařízení např. kalibrů, šablon nebo speciálních měřících přípravků, které jsou určeny pouze pro daný díl. Tyto přípravky si může dodat zákazník nebo se nechávají speciálně navrhovat a vyrábět. V dnešní době lze také použít moderní zařízení, jako jsou souřadnicové měřící stroje či stále oblíbenější 3D digitální optické skenery. I zde ale záleží na dohodě výrobce se zákazníkem, jaká měřidla a technologie se pro rozměrovou kontrolu použijí. Dosahovaná přesnost u odlitků je většinou v tolerancích $\pm 0,2\text{mm}$. Náročnější zákazníci požadují rozměrovou přesnost v tolerancích $\pm 0,1\text{mm}$.

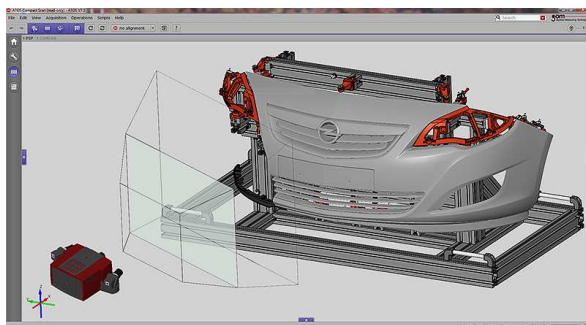
Pro tvarovou a rozměrovou kontrolu přených odlitků je firma Prague Casting Services a.s. vybavena novým 3D optickým skenerem. Toto zařízení se nepoužívá pouze na kovové díly, ale lze ho velice dobře použít i na kontrolu voskových modelů, díky čemuž lze získávat mnoho dat a informací o závislosti vosku a kovu (smrštění).



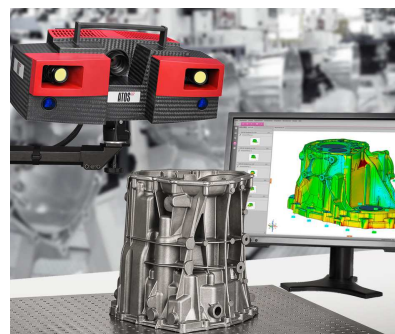
Obr. 18 ATOS sken 3D [16]



Obr. 19 ATOS sken 3D [16]



Obr. 20 ATOS sken 3D [16]



Obr. 21 ATOS sken 3D [16]

2.5.3 Kontrola vnitřní jakosti (destruktivní či nedestruktivní metody) [1], [3]

Je metoda, která zajišťuje kontrolu vnitřních staženin, bublin, ředin atd. Kontrola se provádí u odlitků, které mají vysoké nároky na vnitřní jakost odlitků tj. u odlitků pro letecký, energetický a automobilový průmysl. Rozsah kontroly a kritéria



hodnocení vnitřní jakosti odlitků jsou dána zákaznickými specifikacemi, ve kterých by neměla chybět možnost a způsob opravy menších vad. Vnitřní jakost se ve slévárnách přesného lití nejčastěji kontroluje nedestruktivními metodami (NDT), jako jsou roentgen, ultrazvuk nebo game-defektoskopie. Nedestruktivní metody lze systematicky rozdělit na optické, akustické, elektromagnetické, tepelné, radiografické a vzájemně propojené. Slévárenský průmysl používá z velkého počtu technik a alternativ nedestruktivního zkoušení následující metody: vizuální, penetrační, magnetické, ultrazvukové a roentgenové.



Obr. 22 RTG přístrojem PHILIPS MG 452 [17]

2.5.4 Kontrola vlastností (destruktivní či nedestruktivní metody) [1], [3]

Vlastnosti materiálů se obvykle zkouší destruktivními metodami. Nejčastěji se zkouší porezita, struktura materiálů a povrchové oduhličení. Pro tyto zkoušky je zapotřebí vyrobit metalografický vzorek, kterých může být z jednoho odlitku vyrobeno několik. Dále mezi destruktivní metody řadíme tahové zkoušky (za pokojové teploty nebo za vyšších teplot, ty pak nazýváme CREEP zkoušky tj. zkouška materiálu tečením) a chemickou analýzu materiálu. U mechanických zkoušek se nejčastěji vyhodnocuje mez pevnosti, tažnost a kontrakce (zúžení) a tvrdost. Někdy lze také kontrolovat vrubovou houževnatost.

Dané mechanické zkoušky lze použít pro validaci materiálů nebo si také může zákazník vyžádat mechanické zkoušky přímo z taveb litých při výrobě dílů. Tak si lze ověřit přímo kvalitu litého materiálu. Dle požadavků zákazníka lze také kontrolovat



mechanické hodnoty na zkušebních tyčkách, které jsou vyrobeny přímo z kritických míst odlitků. Pouze tak lze ověřit, zda vyrobený odlitek bude splňovat požadované mechanické vlastnosti. Pokud zákazník tahovou zkoušku vyžaduje, musí být opět uvedena v daných specifikacích a musí být dohodnuto, jakých hodnot se má při zkoušce dosáhnout, popřípadě, pokud zkouška nevyjde, kolikrát lze zkoušku opakovat. Dosahované mechanické hodnoty se mohou odlišovat od materiálového listu, neboť zaleží na místě, ze kterého se zkušební tyčka vyrobila.

2.6 NÁVRH A VÝROBA TEPELNÉHO ŠTÍTU PRO PLYNOVÉ TURBÍNY VE SLÉVÁRNĚ PRAGUE CASTING SERVICES A.S. [8], [9]

Ve své diplomové práci se budu věnovat hlavním technologickým parametrům, které do procesu vstupují při výrobě samotného voskového modelu a ovlivňují rozměrovou a tvarovou přesnost odlitků vyrobených přesným litím. Tyto parametry budu sledovat při výrobě tepelného štítu „heat shield“ vloženého do plynové turbíny. Samotná výroba jednotlivého dílu s sebou přináší několik důležitých kroků:

a) Zadání výroby formy pro voskový model [8], [9]

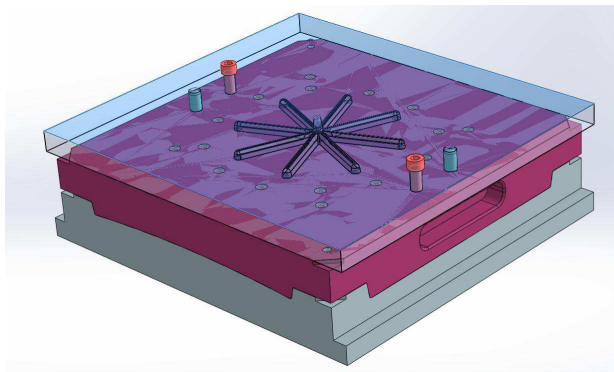
Prvním krokem je výroba formy pro voskový model. S tím se váže několik zásadních a v podstatě nejdůležitějších kroků, které hned na začátku ovlivňují výsledek celého projektu.

Nejdůležitější je volba smrštění, která je pro každý díl jiná a to v závislosti na velikosti dílu a jeho tvarové složitosti, zda se bude lisovat s chladítkem³ či bez něj a v neposlední řadě se také bere v úvahu typ a vlastnosti použitého vosku. U vyráběného dílu se stanovilo v závislosti na velikosti dílu a zkušenostech smrštění 2,9%. Díl je poměrně tenkostěnný, a tak se zvolilo lisování bez chladítka.

³ Chladítko neboli vosková výztuha se vyrábí ze stejného vosku jako voskový model. Jde v podstatě o voskové jádro, které má menší rozměry než výsledný voskový model. „Chladítko“ se zakládá do kovové formy před lisováním samotného modelu. Musí tedy obsahovat výstupky pro ustavení v dutině kovové formy. Využívá se při lisování rozměrnějších voskových modelů, aby se zvýšila stabilita odlisovaných modelů a zmenšilo se smrštění vosku. To vše přispívá k vyšší přesnosti voskových modelů. Důvodem, proč se chladítka používají, je, že se zrovnoměrní tloušťky vosku při lisování nového modelu a tím se eliminuje vznik staženin popřípadě dutin.



Dále se v „Toolbuildu“ (protokol pro výrobu forem) musí nastavit výrobci formy, vhodný typ stroje pro lisování, aby se nestalo, že se vyrobí forma, která nepůjde do používaných lisů. Stanoví se velikost formy a umístění vstřikovací trysky. Pro odlitek je stanoveno horní vstřikování vosku a bude použit stojanový vstřikolis „SIRRON“.



Obr. 23 3D model hliníkové formy pro díl 19-S-12 [9]



Obr. 24 Hliníková forma pro díl 19-S-12 [9]

b) Návrh vtokové soustavy [8], [9]

Dalším krokem je návrh vtokové soustavy pro daný díl. Vtoková soustava musí splňovat několik zásadních kritérií:

Nejdůležitější je splnění zabíhavosti daného tepelného štítu. Pokud by odlitek nezaběhnul, tedy nevyplnil dutinu keramické formy, stoprocentně se jedná o zmetek a návrh vtokové soustavy je špatný. Je tedy potřeba přistupovat k návrhu vtokové soustavy zodpovědně. Vytvořit nejprve několik náčrtů, promyslet za jakou část díl navtokovat – připojit na hlavní vtokový kůl. Dále je potřeba zvážit tvorbu teplotních uzlů a s tím spojenou tvorbu staženin a mikroporezity.

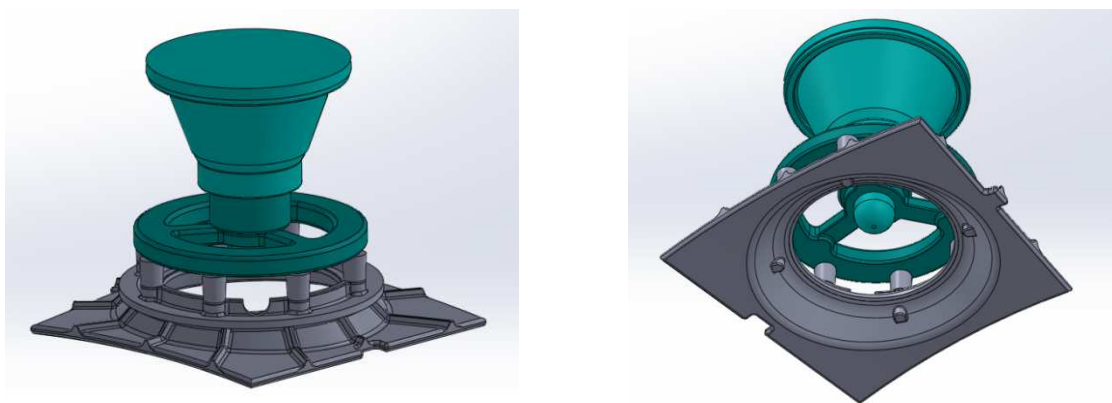
Dalším hlediskem při návrhu vtokové soustavy je její samotná velikost. Při volbě velikosti stromečku se musí brát ohled na několik důležitých parametrů. Prvním je velikost a samotná váha celého stromečku na obalovací lince, kde by robot při manipulaci mohl při příliš dlouhém stromečku zavadit o míchadla na dně obalovací břečky, a došlo by k poškození voskových modelů. Z toho důvodu se musela navrhnout vtoková soustava pouze pro jeden tepelný štít. Pokud by byly na voskovém stromečku dva díly, překročila by velikost stromečku 400mm a mohl by se stromeček poškodit. Při vytavení skořepiny v autoklávu se sleduje, aby šel daný stromeček uzavřít do autoklávu, kde dochází k vytavení vosku z keramické formy.



Posledním zařízením, kde se hlídá velikost již už vzniklé formy je vakuová lící pec, kde by opět mohlo dojít k poškození formy, pokud by byla příliš velká.

Dále se při návrhu vtokové soustavy musí zohlednit možnost odřezání samotného odlitku po odlití. Tedy musí se dát prostor řezači, aby mohl pohodlně odříznout odlitek, a aby nedošlo k jeho poškození řezacím kotoučem.

Klíčovým hlediskem je ekonomičnost výroby navržené vtokové soustavy, jelikož daný díl se bude vyrábět z INCONELU 738LC, což je velice drahá niklová slitina. Cena niklových slitin se běžně pohybuje v řádech několika stokorun, proto je nutné dbát na finanční hledisko se stejnou vahou jako na hlediska ostatní výše vyjmenovaná. V tomto případě se jednalo o kombinaci všech výše zmíněných parametrů, které vedly k návrhu vtokové varianty s pouze jedním modelem. Musí se tedy alespoň maximálně optimalizovat výtěžnost kovu - vtoková soustava vs. samotný odlitek ovšem se zřetelem na vnitřní jakost odlitku.



Obr. 25 3D model voskového stromečku 19-S-12 [9]

c) Návrh technologicko- procesních parametrů [8], [9]

Při navrhování technologických parametrů firma PCS využívá již dlouhodobé zkušenosti a právě tyto zkušenosti jsou součástí vlastního know-how. Mezi hlavní procesní parametry spadá počet keramických obalů, sibalový zábal keramické skořepiny, lící teplota, tepelné zpracování a nakonec návrh kontrol BLD a RTG. Při stanovení počtu keramických obalů se zvažuje velikost daného odlitku a metalostatický tlak. Tepelný štít se váhou, velikostí a výškou voskového stromečku 250mm blíží spíše malým voskovým soustavám, je tedy použito 11 keramických obalů, kde pevnost skořepiny bude dostačující. Více jak 11 obalů se používá u



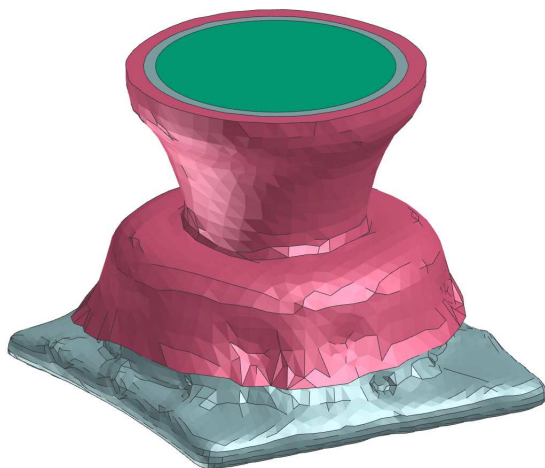
Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

větších odlitků např. segmentů plynových turbín a u voskových soustav, které mají výšku okolo 300-350mm.

Sibralový zábal se používá na zateplení keramické skořepiny na místa, která jsou kritická při zabíhání kovu do dutiny formy. Jsou to tedy všechna tenká místa na dílech, jako jsou lopatky plynových turbín (např. tenké odtokové hrany). Dále se sibralový zábal používá na hlavní vtokovou soustavu a licí jamku, u které je zapotřebí, aby v ní zůstal kov co nejdéle tekutý a plnil doplňující funkci. Toho se využilo i v případě tepelného štítu, kdy se zabalila celá hlavní vtoková soustava a všechny zářezy.

Licí teplota je další důležitý technologický parametr, kterým se dá ovlivnit např. zabíhavost, mikro struktura, porezita apod. Licí teplota se volí obvykle 70°C - 100°C nad hranicí teploty likvidu. Teplota likvidu u slitiny IN 738 LC je 1345°C. S ohledem na složitost dílu a jeho tenkostěnný profil volíme teplotu lití 1440°C.



Obr. 26 Sibralový zábal skořepiny dílu
19-S-12 [9]



Obr. 27 Sibralová vata [9]

d) Ověření funkčnosti vtokové soustavy [8], [9]

V rámci moderních technik vývoje je možné využití různých typů simulačních softwarů, které dokáží na základě definovaných parametrů predikovat možnost výskytu vnitřních vad a poskytnout cenné informace ještě před provedením prvních reálných zkoušek. Jelikož nám dnešní moderní výpočtové programy umožňují v počítači nasimulovat a následně graficky zobrazit celý proces lití a samotného tuhnutí i vznik tepelných uzlů, je volba vtokové soustavy značně zjednodušená. S tím souvisí i ekonomické hledisko, tedy při návrhu vtokové soustavy se tak neplýtvá zbytečně



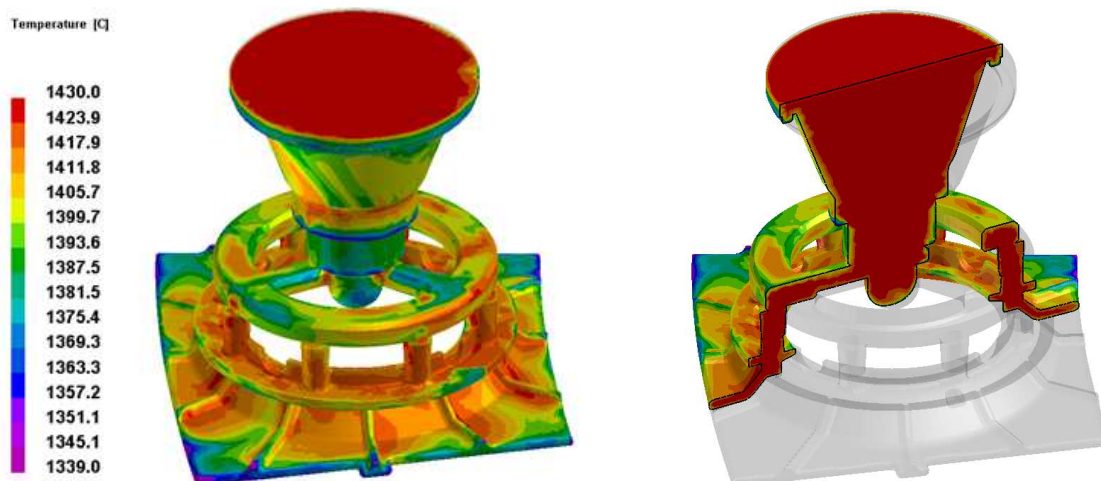
Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

drahým kovem při ověřování funkčnosti vtokové soustavy a vše se děje pouze v počítačové simulaci. V tomto případě simulace nepřinesla žádné závažné komplikace v podobě mikrostaženin. Vtoková soustava, licí teplota a sibalový zábal jsou tedy s největší pravděpodobností navrženy správně.

Jelikož je výroba voskové formy časově náročná a čas na zhotovení projektu je velice krátký, volí se proto nejprve zhotovení 3D modelu metodou „Rapide prototyping“. Takto se nechá vyrobit model tepelného štítu, který je zvětšený o smrštění vosku a kovu, aby se co nejreálněji přiblížil dutině voskové formy.

Následně se vyrobený díl zalije do formy tekutého lukoprenu, který se po 24 hodinách vytvrdí, čímž se získá přibližná dutina formy daného modelu. Do dutiny se vyřežou vtokové a odplyňovací kanály a odlije se několik voskových modelů. Modely se nechají nalepit na odsimulovanou – funkční vtokovou soustavu a výsledky se ověří v reálné praxi. Pokud dopadnou výsledky z hlediska zabíhavosti, makro a mikrostruktury přijatelně, je vtoková soustava navržena správně.



Obr. 28 Průběh teplot po odlití dílu 19-S-12 v programu ProCast [9]

e) Výroba zkušební dávky [8], [9]

Nejdůležitějším momentem je obdržení samotné formy pro výrobu voskového modelu od výrobce.

Pokud je forma navržena správně, tak je vše na dobré cestě pro odlisování kvalitních voskových modelů. Na začátku lisování je třeba si uvědomit, co se vlastně požaduje a o jaký díl se jedná - zda je tenkostěnný či tlustostěnný nebo zda obsahuje



Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

chladítko či ne apod. Na základě toho se určí lisovací parametry: teplota vosku, vstřikovací rychlost, vstřikovací tlak a dotlak, výdrž vosku ve formě apod. Všechny parametry jsou navzájem propojeny, a pokud jsou správně nastaveny, může se odlisovat zkušební dávka. Počet kusů ve zkušební dávce si většinou volí zákazník. U tepelného štítu nebyl s odlisováním větší problém, neboť díl neobsahuje žádné keramické jádro. Menší problém byl s rozebíráním formy, neboť je forma poměrně členitá a skládá se z několika kusů kamenů.

Součástí lisování u tepelného štítu je i tzv. kalibrace voskového modelu v chladící vodě. Pro kalibraci je navržen speciální „wax reformer“, který je pro první lisování nastaven na nominální hodnotu, následně lze vosk pomocí reformeru předdeformovat a tím tak dosáhnout správných rozměrů na kovovém díle.

Po odlisování následuje kontrola tvarové a rozměrové přesnosti voskového modelu na 3D skeneru. Použitý skener pracuje na principu dvou kamer, které na model promítají rastr, ten se odráží a tak vzniká postupným snímáním 3D model dané součásti. Je dobré voskové modely nastříkat práškovou křídou pro větší přesnost. Jakmile se naskenuje voskový model, následně se v počítači porovná s nominálním modelem. Pokud je voskový model v požadované toleranci, může se postoupit k další operaci.

Následně se z voskových modelů sestaví stromečky a postoupí se celý výrobní proces přes keramiku, vytavení v autoklávu, přípravu skořepin až po lití kovu do keramické skořepiny.

Jakmile se díly odlíjí, odřežou od vtokové soustavy, zabrousí vtoky a ocídí funkční plochy, přistoupí se ke kontrolám v pořadí vizuální kontrola, BLD⁴ a v poslední fázi RTG a rozměrová kontrola, která se opět provádí na 3D skeneru. Pokud je vše opět ideální, tj. nejsou na odlitku vizuální vady, jako např. BLD nepoukazuje na povrchové vady typu studených spojů a RTG na vnitřní staženiny či vměstky atd. a rozměry jsou v zákaznickem určených tolerancích, práce byla odvedena správně a můžeme přistoupit k ověřovací dávce. U tepelného štítu se na žádný problém nenarazilo, vše dopadlo ideálně až na 3D rozměrovou kontrolu, která poukázala na tvarovou nepřesnost v odchylkách do 0,7mm. Na základě poznatků ze 3D skeneru se

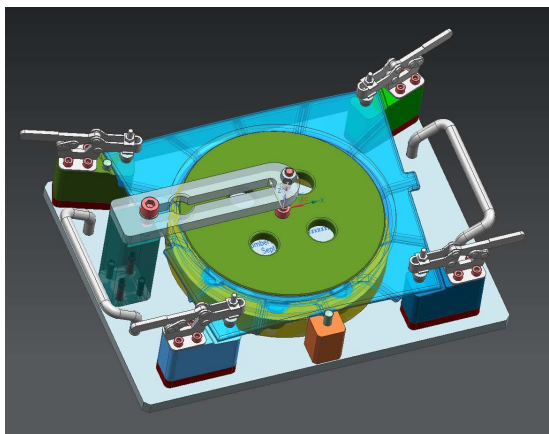
⁴ BLD - barevně-luminiscenční kontrola



Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

přistoupilo k částečné úpravě „wax reformeru“ a dotáhly se rozměry do požadovaných tolerancí.



Obr. 29 3D model fixačního přípravku [9]



Obr. 30 Fixační přípravek „Wax reformer“ [9]



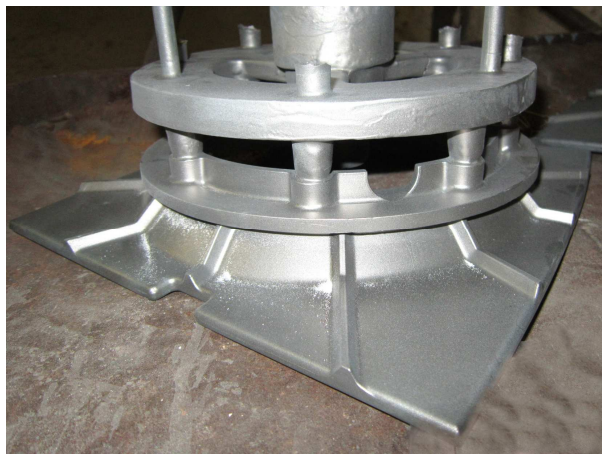
Obr. 31 Voskový stromeček dílu 19-S-12 [9]

f) Výroba ověřovací dávky [8], [9]

V případě ověřovací dávky se postupuje stejně jako u dávky zkušební. Od odlisování voskových modelů přes sestavení stromečků, výrobu keramické skořepiny až po odlití a všechny kontroly. Pokud ani ověřovací dávka neprokáže nějaké závažné chyby v navržené technologii, byla technologie navržena správně.



Obr. 32 Výroba keramické formy [9]



Obr. 33 Otryskaný odlitý stromeček [9]

g) Hromadná výroba [8], [9]

Hromadná výroba může začít tehdy, pokud je veškerá výrobní dokumentace pro daný díl předána a schválena výrobou. Před schválením dokumentace ji nejprve výrobní oddělení připomínkuje z hlediska výrobních časů a postupů. Posléze, pokud se technologie s výrobou dohodne na předložené dokumentaci daného dílu, hromadná výroba může být zahájena.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE [8], [9]

Účelem experimentální části diplomové práce je sledování závislostí kvality voskových modelů (u metody výroby forem na vytavitelný model) v souvislosti s přesností rozměrů odlitků. K tomuto účelu byly použity modely pro výrobu odlitků tepelných štítů pro pozemní plynové turbíny. Přehled výroby těchto odlitků je uveden v kapitole 2.6 této práce.

3.1 PŘEHLED VŠECH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ OVLIVŇUJÍCÍCH KVALITU VOSKOVÉHO MODELU, TVAROVOU A ROZMĚROVOU PŘESNOST

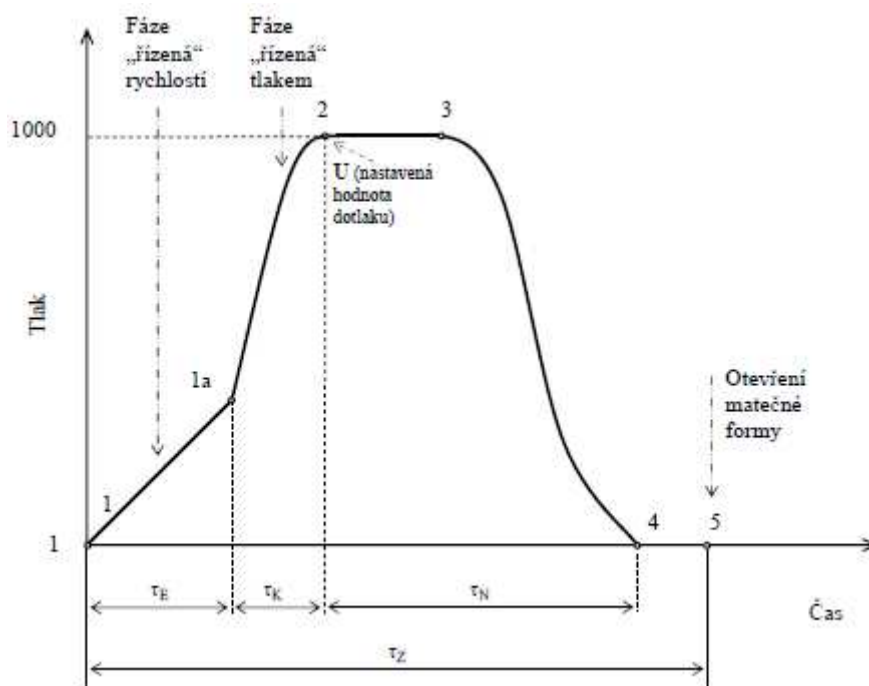
V této části diplomové práce je třeba vycházet z obecných poznatků, které se týkají výroby, resp. „lisování“ voskových modelů. V této souvislosti je nutno konstatovat, že převážná část voskových modelů pro výrobu přesných odlitků je



Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

vyráběna na vstřikovacích lisech. Současně výrobu voskových modelů ovlivňuje několik základních technologických parametrů, které mohou mít vliv na výslednou kvalitu voskového modelu a tedy i celého procesu přesného lití. Mezi takové hlavní technologické parametry se řadí např. teplota vosku a formy, či tlaky a časy v jednotlivých fázích cyklu. Taktéž velmi důležitý pro řešení vlastních experimentů je průběh tlaků v dutině formy při vstřikování, viz obr. 34.



τ_E – doba plnění dutiny, τ_K – nárůst tlaku na hodnotu dotlaku, τ_N – doba prodlevy (výdrže),
 τ_Z – celková doba vstřikování voskového modelu (až po otevření formy)

Obr. 34 Průběh tlaku v dutině formy během procesu vstřikování voskového modelu [4]

Při řešení uvedených experimentů bylo třeba nastudovat jednotlivé technologické parametry vstřikolisu a u jednotlivých zkoušek lisování dbát na jejich vzájemnou souvislost. Jednotlivé parametry spolu vzájemně souvisí a při špatné kombinaci následujících parametrů se může vyrobít rozměrově špatný voskový model. Jedná se o tyto parametry:

Teplota vosku ve vstřikovacím stroji – měla by být konstantní v celém stroji, tzn., teplota vosku v zásobníku by se měla shodovat s teplotou vosku v trysce.

Teplota vstřikovací trysky – teplota vstřikovací trysky by neměla klesnout pod hranici 65°C, pokud teplota klesne pod uvedenou hranici, může dojít k zatuhnutí

Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

vosku v trysce. Pokud to parametry stroje dovolují, měla by se dodržet konstantní teplota vosku v celém stroji.

Teplota formy – pokud by byla teplota formy příliš malá, mohlo by dojít k špatnému zastříknutí dutiny - zejména u tenkostěnných a složitých detailů se musí dbát na předehřev kovové formy. Naopak pokud bude teplota formy příliš vysoká, vstřikovaný vosk, respektive model, bude chladnout velmi pomalu a nepůjde vyjmout z dutiny formy – bude se deformovat.

Vstřikovací tlak – měl by být dostatečně vysoký k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu. Pokud se nastaví vstřikovací tlak příliš vysoký, bude docházet k zástříkům vosku v dělicí rovině. Naopak pokud bude vstřikovací tlak příliš nízký, bude docházet k nezastříknutí voskového modelu.

Dotlak a doba dotlaku – Po zaplnění dutiny formy stoupá tlak na maximální hodnotu tj. na hodnotu dotlaku. Obecně při vyšším dotlaku a delší době jeho působení na voskový model lze říct, že výsledný model je kvalitnější, neboť je vosk déle vystaven kopírování tvaru v dutině formy.

Svírací tlak – se nastavuje dle typu stroje a v závislosti na vstřikovacím tlaku v rozmezí od 6 do 300 tun.

Průtoková rychlost – je nejdůležitějším parametrem při vstřikování slabostěnných modelů nebo modelů s nepravidelnými tvary. Průtoková rychlost by měla být tak vysoká, aby vosk dostatečně rychle vyplnil formu, ale zároveň by měla být dostatečně pomalá k zabránění turbulence a vzniku vzduchových bublin.

Doba vstřikování – měla by být dostatečně dlouhá, aby bylo zajištěno dostatečného vyplnění kovové formy.

Doba chlazení odlitku ve formě – měla by být tak dlouhá, aby při vyndávání voskového modelu z dutiny formy nedošlo k jeho poškození, ale tak krátká, aby byl voskový model schopen se předdeformovat, pokud se upíná do „wax reformeru.“

Současně bylo nutno dbát na zbylé dva parametry, které neovlivňují samotné lisování, ale i přesto ovlivňují výslednou tvarovou přesnost voskového modelu. Jedná se o parametry, které vstupují do celého procesu lisování v samotném závěru tj. po vyjmutí vosku z kovové formy. Jde o chlazení voskového modelu ve fixačním přípravku. Mezi zmíněné parametry patří:



Teplota chladicího media – některé tvarově náročné odlitky se po odlisování vkládají do speciálně navržených přípravků, ve kterých se vkládají do chladicí vody. Teplota chladicí vody se pohybuje v rozmezí 8 - 12°C. Pokud by byla teplota příliš nízká, docházelo by ke zkřehnutí voskového modelu a naopak pokud by byla teplota nastavena vyšší, neplnila by funkci stabilizace voskového modelu.

Doba chlazení – je pro každý díl jiná v závislosti na velikosti dílu (tloušťce stěn dílu). Obecně se dá říct, že doba chlazení se pohybuje kolem dvou minut.

3.2 DEFORMACE VOSKOVÝCH MODELŮ A JEJÍ ELIMINACE [8], [9]

Jelikož je voskový model velmi křehký a při zvýšené teplotě poměrně snadno deformovatelný, bylo třeba prostudovat možná rizika deformace voskových modelů a zjistit možnosti její eliminace.

Deformace voskových modelů - Ve voskových modelech vzniká při jejich výrobě pnutí, které se později uvolňuje a tím vzniká nechtěná deformace voskových modelů. Hlavní příčinou vzniku deformace je lineární smrštění a uvolňování napětí, které vzniká při chladnutí vyrobeného voskového modelu. Z těchto poznatků lze tvrdit, že deformace má tedy časovou a teplotní závislost. Deformaci lze rozdělit do dvou časových pásem na deformaci hlavní a vedlejší. Hlavní deformace vzniká během prvních 24 hodin po odlisování. V této době vzniká až 90% celkové deformace. Deformace vedlejší je označována za dobu po 24 hodinách, kdy vzniká zbytková deformace.

Použití fixačních přípravků a chladítek / chlazení voskových modelů - Pro zabránění hlavní deformace a současně i pro předdeformaci se dnes používají speciálně navržené fixační přípravky „wax reformery“ a chladítka. Fixační přípravky bývají vyrobeny ze slitin hliníku. Jsou do nich vkládány voskové modely ihned po odlisování a nechávají se zchladit v chladicí vodě, kde by díky přechlazení měly ztratit alespoň částečně tzv. *tvarovou paměť*, tedy uvolnit svoje vnitřní pnutí a dále se již nedeformovat. Díky tomuto postupu by se mělo částečně zabránit – eliminovat tvarové deformaci a zafixovat model ve stabilní poloze. Dnes se tyto přípravky



Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

používají především u tvarově náročných dílů, kde je zapotřebí vysoký stupeň přesnosti.

Uskladnění voskových modelů - Přesnost voskového modelu může také ovlivnit teplota a způsob jeho uskladnění. Proto se vyrobené modely nechávají minimálně 12 hodin relaxovat při okolní teplotě cca 20°C. Při příliš vysoké teplotě by mohlo dojít k vysoko-elastickému tečení, při kterém se uvolňuje zbytkové pnutí. Uskladnění voskových modelů je neméně důležité jako teplota. Každý díl má jiné ustavení, například u lopatek se využívá zámková část, za kterou se lopatky zavěsí na stojany, viz obr. 35. Takto uskladněné modely nejsou zatěžovány vlastní vahou, čímž by nemělo dojít k vyvolání nežádoucí deformace. Je tedy nutné zabývat se také polohou, ve které voskové modely setrvají před další operací.



Obr. 35 Zavěšení lopatek na stojanu za zámkovou část [9]

3.3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ HLAVNÍCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ PŘI VÝROBĚ VOSKOVÉHO MODELU NA KONEČNOU PŘESNOST ODLITKŮ [8], [9]

Použitá součást pro experimentální část diplomové práce:

Zkoumaná součást: Tepelný štít plynové cesty pozemní plynové turbíny

Materiál matečné formy: dural

Výrobce: Prague Casting Services a.s.

Vstřikovací lis: Sirron

3D měřicí zařízení: ATOS Compact Scan 2M

Materiál modelu: plněný vosk Remet Hyfill B417

Materiál odlitku: INCONEL 738LC

Hmotnost kovového odlitku: 3,4kg

Tab. 1 Souhrnná tabulka provedených zkoušek

ETAPA	Počet vyrobených vosků / kovů	Popis provedené zkoušky	Nastavení fixačního přípravku pro vosk
Výroba voskových dílů			
č. 1.	7	Výroba vosk. modelů, z těchto vosků byly vybrány dva modely, ze kterých se vyrobily kovové díly pro zjištění závislosti VOSK - KOV.	nominální – nastavení od výrobce přípravku
č. 2.	10	Výroba vosk. modelů pro ověření stability procesu lisování	přenastaven v pěti bodech
č. 3.	14	Výroba vosk. modelů při změnách technologických parametrech. Celkem proběhlo sedm zkoušek. U každé zkoušky se změnil jeden parametr a odlisovaly se dva voskové modely.	přenastaven v pěti bodech
Výroba kovových dílů			
č. 1.	2	Odlité kovové díly se použily pro zjištění závislosti VOSK - KOV	-

3.3.1 Lisování vlastního voskového modelu – tepelného štítu a zjištění závislosti vosk – kov [8], [9]

Lisování voskových modelů tepelného štítu spalovací turbíny se provádělo na vstřikolisu Sirron s vertikální tryskou, který vlastní slévárna Prague Casting Services a.s.. Pro tento stroj byla navržena a vyrobena forma s horním vstříkem. Dále byl vyroben speciální fixační přípravek, který je od výrobce nastaven na nominální hodnoty. Tyto přípravky jsou konstruovány tak, aby v případě deformace kovu mohly vosk předdeformovat natolik, aby se deformace kovu eliminovala, v nejlepším případě zcela odstranila a odlitek se tak vyrobil v požadovaných tolerancích.

Prvním krokem je nastavení vstřikovacího stroje tzn. nastavení jeho hlavních technologických parametrů tak, aby se z formy získal kvalitní voskový model. Tyto parametry jsou uvedeny v tab. 2.

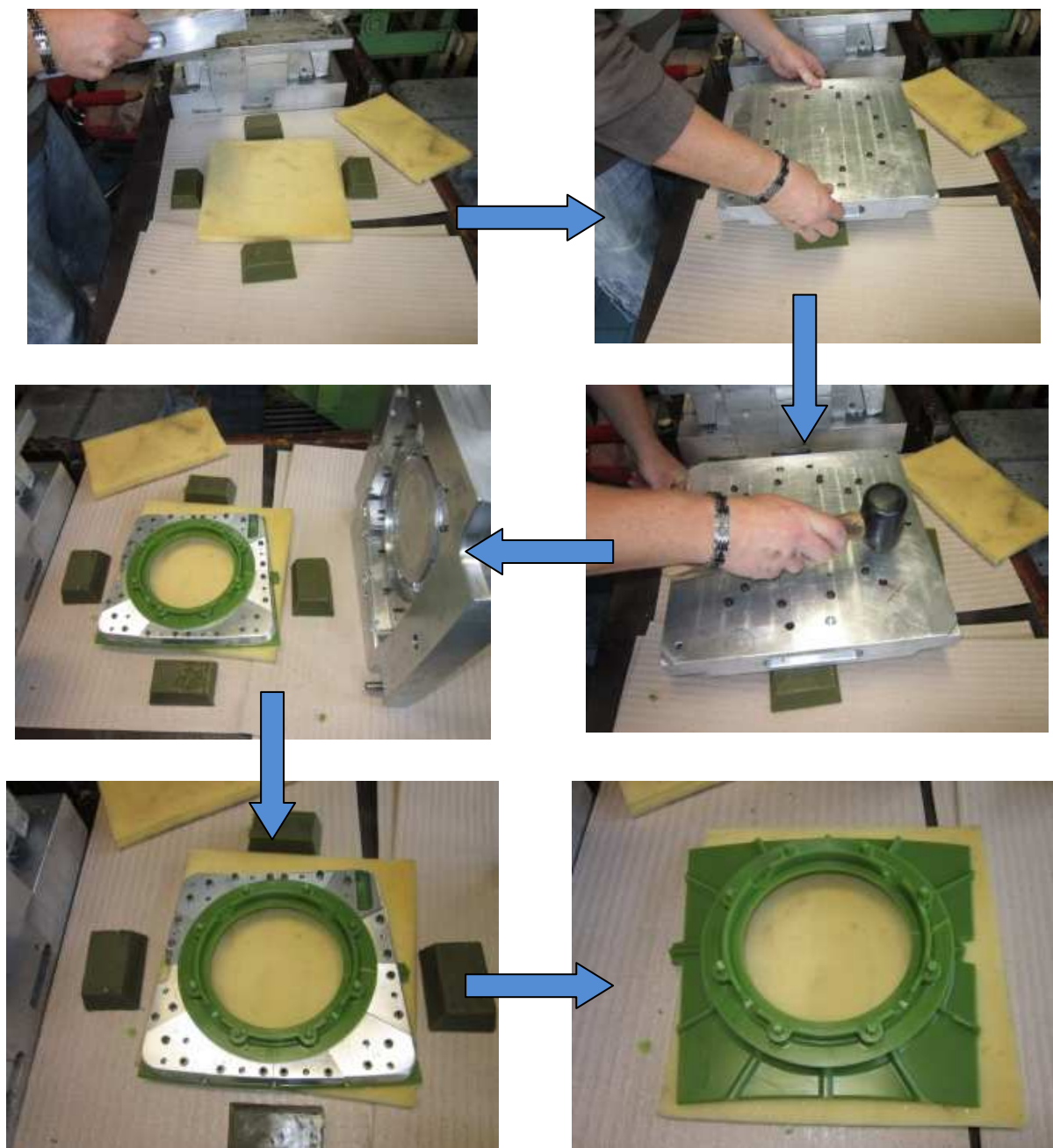
Tab. 2 Hodnoty vstřikovacího stroje pro lisování voskových modelů č. 1P – 7P

Číslo zkoušky	Teplota na modelárně [°C]	Teplota vosku v zásobníku [°C]	Teplota trysky [°C]	Vstřikovací tlak [bar]	Rychlost vstřikování	Čas vstřikování [s]	Čas dotlaku [s]	Čas chlazení [min]	Teplota chladicí vody [°C]	Použití přípravku
1P-7P	20	73	74	3	Max.	90	90	5	9	ANO

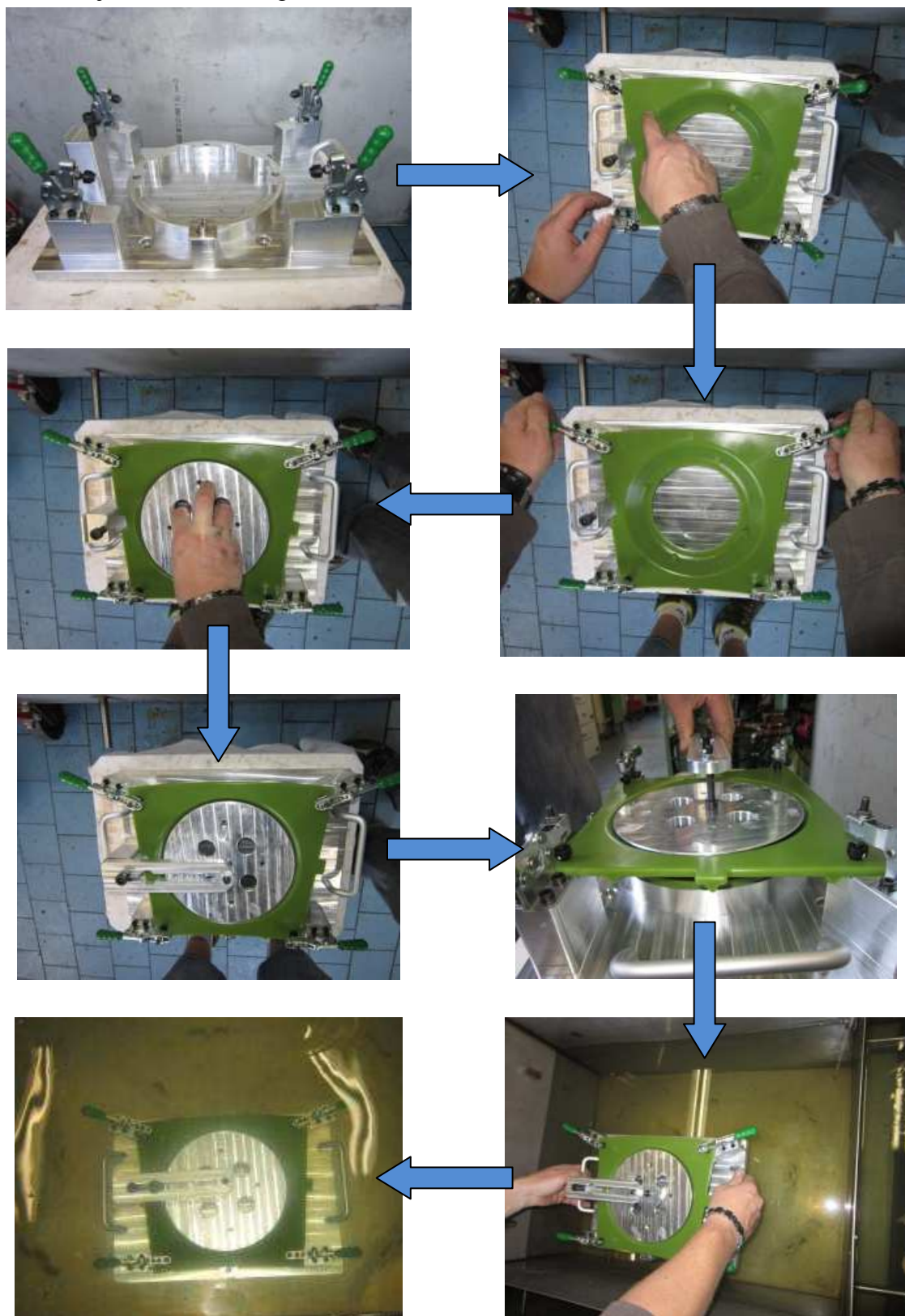
Po nastavení a odladění devíti technologických parametrů, které jsou uvedeny v tab. 2., se přistoupilo ke zjištění závislostí kov – vosk. Postupovalo se tak, že se odlisovalo sedm kusů voskových modelů dle technologických parametrů uvedených v tab. 2. Takto odlisované modely byly založeny do fixačního přípravku, který jak bylo popsáno výše, je od výrobce nastaven na nominální hodnoty.

Postupy vyjmutí vosku z dutiny formy a založení voskového modelu do fixačního přípravku jsou uvedeny na obr. 36 a 37. Po upnutí voskového modelu do fixačního přípravku je fixační přípravek společně s voskovým modelem vložen do chladicího média viz obr. 37.





Obr. 36 Postup vyjmutí voskového modelu z dutiny formy [9]



Obr. 37 Postup zakládání vosku do fixačního přípravku a chladící vody [9]

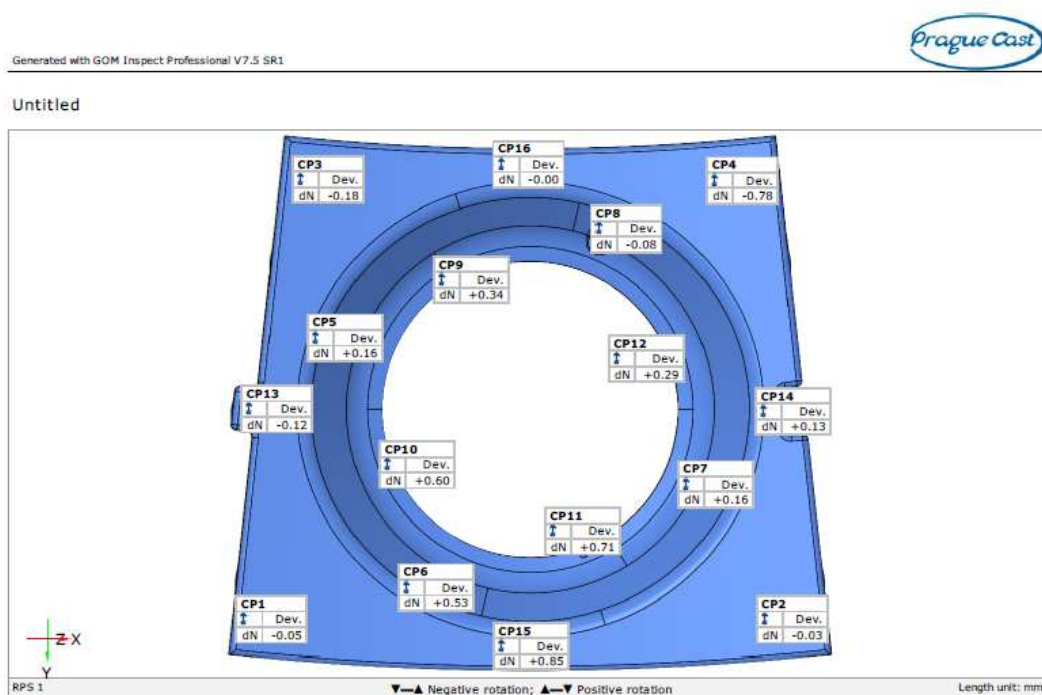
Po pěti minutách byly voskové modely vyjmuty z fixačního přípravku a vložily se na připravený ták, viz obr. 38, kde voskové modely „relaxovaly“ 12 hodin.



Obr. 38 Ustavení voskového modelu po vyjmutí z fixačního přípravku [9]

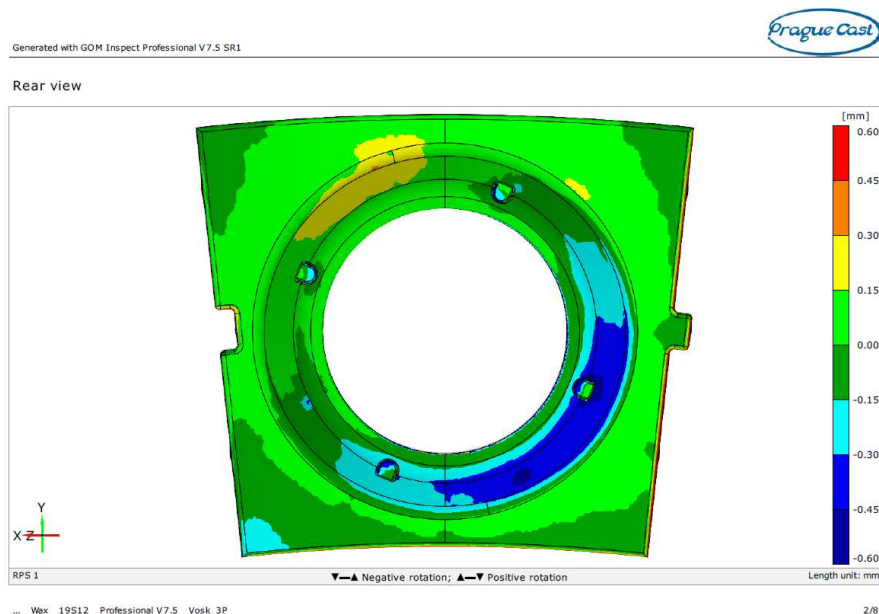
3.3.2 Stanovení deformačních charakteristik VOSK – KOV [8], [9]

Pro možnost stanovení závislostí bylo zvoleno 16 bodů, mezi kterými se budou sledovat závislosti vosk – kov. Tyto zvolené body jsou znázorněny na obr. 39.

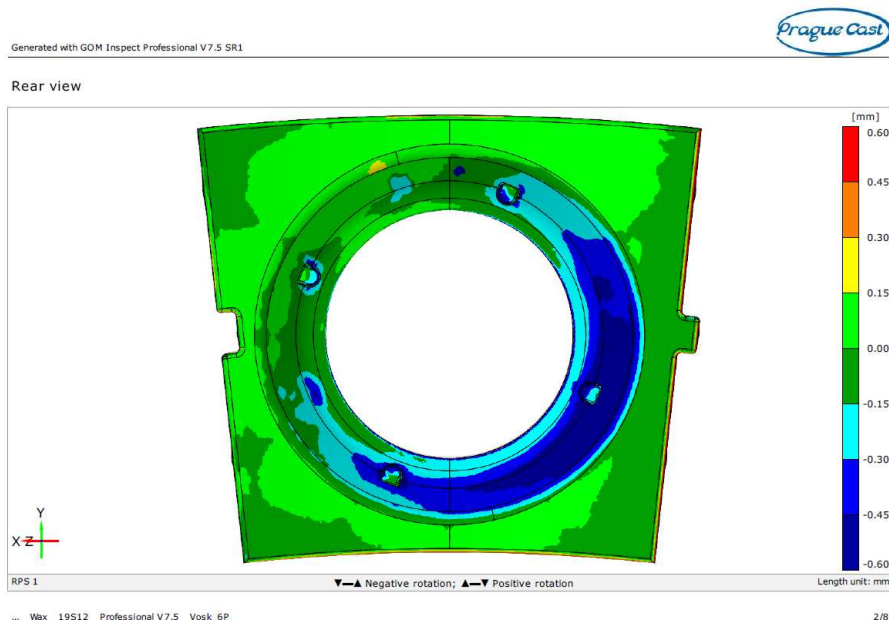


Obr. 39 Rozmístění měřících bodů pro stanovení závislosti posunů vosk – kov [9]

Všech sedm odlisovaných vosků bylo naskenováno a posléze vyhodnoceno v systému ATOS GOM INSPECT Professional principy skenování a vyhodnocení vyrobených dílů jsou uvedeny v kapitolách 3.4.2 a 3.4.3 této práce. Pomocí odchylek barevných map bylo zjištěno, že se nejvíce nominálním hodnotám přiblížily vosky 3P a 6P. Z těchto voskových modelů se nechaly vyrobít dva kovové díly. Vyhodnocení barevných map při tolerancích $\pm 0,15\text{mm}$ je znázorněno na obr. 40 a 41.

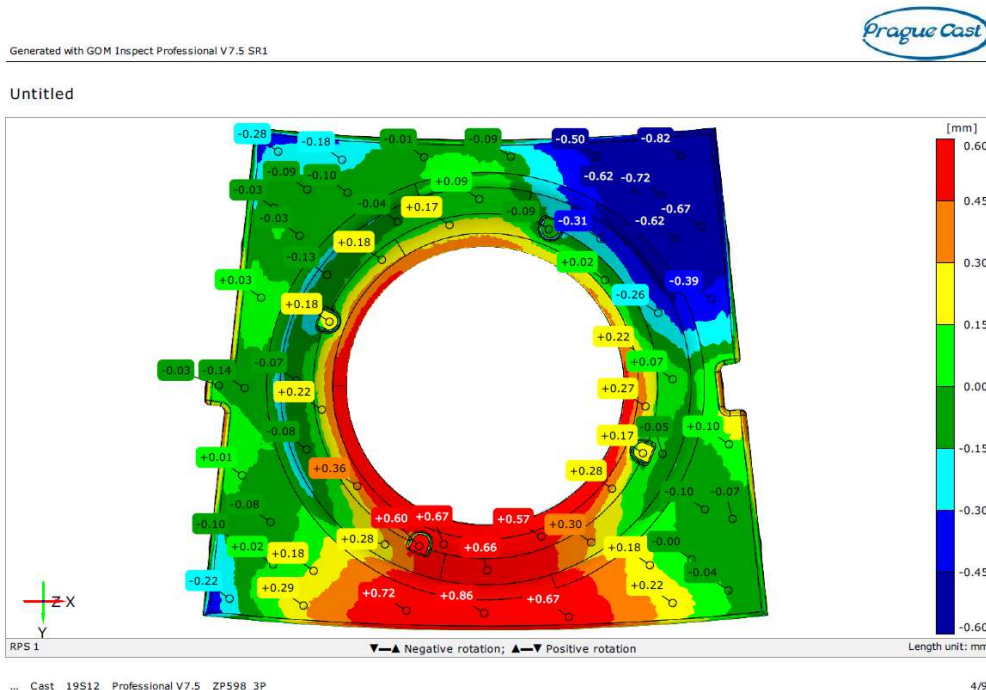


Obr. 40 Barevná mapa pro vosk 3P [9]

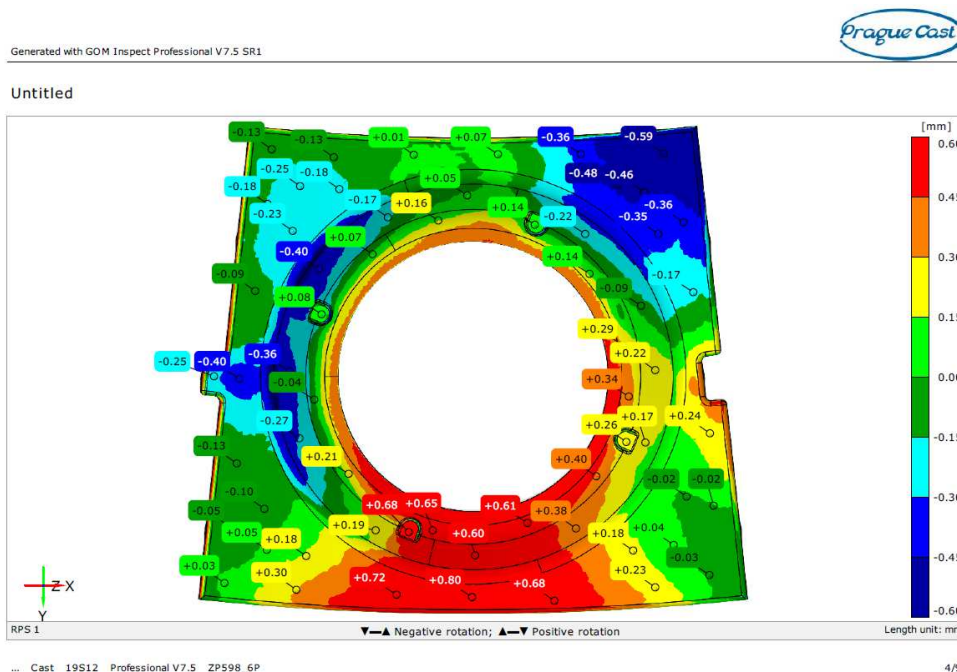


Obr. 41 Barevná mapa pro vosk 6P [9]

Po výrobě odlitků tepelného štítu metodou přesného lití následovalo už skenování kovových dílů a opět vyhodnocení v programu ATOS. Získané hodnoty se vložily do tab. 3, kde jsou vidět vlastní závislosti vosku a kovu v jednotlivých bodech pro díly 3P a 6P. Z těchto závislostí se získaly hodnoty pro nastavení přípravku.



Obr. 42 Barevná mapa pro kov 3P [9]



Obr. 43 Barevná mapa pro kov 6P [9]

Tab. 3 Hodnoty odchylek od nominálních dat pro vosky a pro kovy

Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_3P	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04	-0,09	-0,02	-0,02	-0,05	-0,15	-0,02	0,09	-0,03	-0,07	0,08	0,08	0,00
VOSK_6P	0,00	-0,02	-0,04	-0,04	-0,16	-0,07	-0,05	-0,06	-0,21	-0,03	0,06	-0,05	-0,08	0,06	0,05	0,00
Ø Ze 2 vosků	-0,01	-0,02	-0,04	-0,04	-0,13	-0,05	-0,04	-0,06	-0,18	-0,03	0,08	-0,04	-0,08	0,07	0,07	0,00
KOV_3P	-0,05	-0,03	-0,18	-0,78	0,16	0,53	0,16	-0,08	0,22	0,60	0,71	0,21	-0,15	0,15	0,85	0,00
KOV_6P	0,00	-0,04	-0,14	-0,68	0,02	0,62	0,25	-0,09	0,21	0,55	0,78	0,19	-0,33	0,27	0,80	0,00
Ø Ze 2 kovů	-0,03	-0,04	-0,16	-0,73	0,09	0,58	0,21	-0,09	0,22	0,58	0,75	0,20	-0,24	0,21	0,83	0,00
Největší posuny				-0,73		0,58				0,58	0,75				0,73	
Posun přípravků				0,7		-0,6				-0,6	-0,7				-0,7	

Po zjištění všech odchylek vosků 3P a 6P a stejných kovů ve vybraných 16 ti bodech se hodnoty zaznamenaly do tab. 3, ze které zároveň vyplynuly největší odchylky na kovových dílech. Největší odchylky jsou v bodech CP4, CP6, CP10, CP11 a v bodě CP15. Z těchto odchylek se vzala převrácená hodnota, která byla zaokrouhlena na desetiny a získaly se tak finální hodnoty pro nastavení fixačního přípravku.

Po přednastavení přípravku se odlišovalo deset voskových modelů při nastavených technologických parametrech, které byly stanoveny na počátku. Tyto hodnoty jsou uvedené v tab. 2. Výsledky této zkoušky jsou uvedeny v tab. 4 a posloužily ke srovnání dalších voskových modelů, u kterých se změnily technologické parametry a sledoval se vliv hlavních technologických parametrů na kvalitu a hlavně přesnost voskového modelu.

Tab. 4 Hodnoty odchylek voskových modelů, na kterých byl použit přednastavený fixační přípravek

Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_1	-0,01	0,01	0,05	0,28	-0,16	-0,23	-0,15	-0,14	-0,21	-0,25	-0,21	-0,1	-0,15	-0,08	-0,22	0
VOSK_2	-0,04	-0,02	0,02	0,26	-0,2	-0,22	-0,16	-0,08	-0,21	-0,25	-0,22	-0,1	-0,17	-0,06	-0,25	0
VOSK_3	-0,02	0,02	0,07	0,2	-0,19	-0,3	-0,26	-0,11	-0,16	-0,28	-0,23	-0,1	-0,14	-0,09	-0,31	0
VOSK_4	-0,01	0	0,07	0,23	-0,17	-0,35	-0,29	-0,15	-0,2	-0,31	-0,25	-0,13	-0,16	-0,13	-0,39	0
VOSK_5	0,01	0,05	0,07	0,2	-0,18	-0,34	-0,2	-0,1	-0,21	-0,28	-0,26	-0,19	-0,09	-0,03	-0,3	0
VOSK_6	0,01	0,01	0,06	0,17	-0,2	-0,42	-0,23	-0,24	-0,22	-0,32	-0,25	-0,13	-0,15	-0,04	-0,3	0
VOSK_7	-0,04	0,01	0,02	0,22	-0,16	-0,22	-0,27	-0,22	-0,19	-0,25	-0,22	-0,17	-0,1	-0,14	-0,2	0
VOSK_8	0	-0,01	0,04	0,21	-0,22	-0,25	-0,18	-0,1	-0,22	-0,31	-0,21	-0,1	-0,13	-0,05	-0,19	0
VOSK_9	0,01	0	0,02	0,25	-0,22	-0,43	-0,19	-0,1	-0,27	-0,25	-0,24	-0,1	-0,15	-0,06	-0,35	0
VOSK_10	-0,01	0,12	0,02	0,3	-0,21	-0,42	-0,21	-0,1	-0,24	-0,33	-0,29	-0,16	-0,15	-0,09	-0,27	0
Ø Z 10 vosků	-0,01	0,02	0,04	0,23	-0,19	-0,32	-0,21	-0,13	-0,21	-0,28	-0,24	-0,13	-0,14	-0,08	-0,28	0



3.3.3 Lisování a chlazení voskových modelů při odlišných technologických parametrech [8], [9]

3.3.3.1 Čas vstřikování

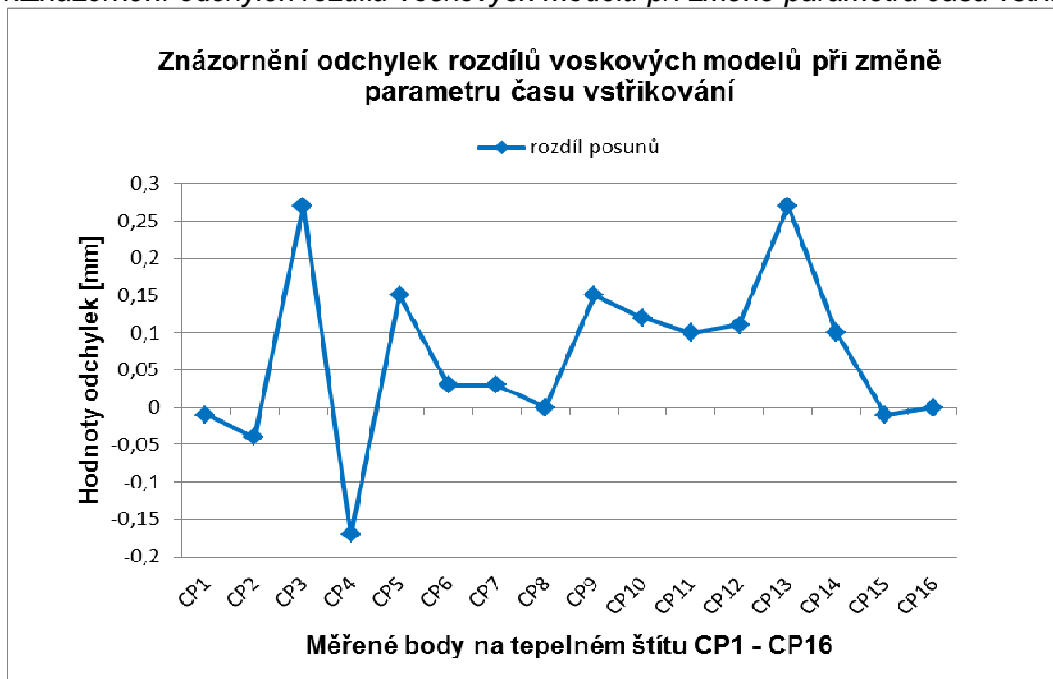
Tab. 5 Hodnoty vstřikovacího stroje při změně parametru času vstřikování

Číslo zkoušky	Teplota na modelárně [°C]	Teplota vosku v zásobníku [°C]	Teplota trysky [°C]	Vstřikovací tlak [bar]	Rychlost vstřikování	Čas vstřikování [s]	Čas dotlaku [s]	Čas chlazení [min]	Teplota chladicí vody [°C]	Použití přípravku
1 – 10	20	73	74	3	Max.	90	90	5	9	ANO
1 – ZK	20	73	74	3	Max.	30	90	5	9	ANO
2 – ZK	20	73	74	3	Max.	30	90	5	9	ANO

Tab. 6 Hodnoty odchylek voskových modelů při změně parametru času vstřikování

Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_1 - 10	-0,01	0,02	0,04	0,23	-0,19	-0,32	-0,21	-0,13	-0,21	-0,28	-0,24	-0,13	-0,14	-0,08	-0,28	0
1 - ZK	0,01	0	0,25	0,08	-0,12	-0,33	-0,26	-0,15	-0,13	-0,25	-0,18	-0,08	0,05	-0,06	-0,26	0
2 - ZK	-0,04	-0,04	0,37	0,04	0,04	-0,25	-0,1	-0,1	0,02	-0,06	-0,09	0,04	0,2	0,09	-0,32	0
Ø Z 1 a 2 ZK	-0,02	-0,02	0,31	0,06	-0,04	-0,29	-0,18	-0,13	-0,06	-0,16	-0,14	-0,02	0,13	0,02	-0,29	0
Rozdíl posunů	-0,01	-0,04	0,27	-0,17	0,15	0,03	0,03	0	0,15	0,12	0,1	0,11	0,27	0,1	-0,01	0

Graf 1: Znárodnění odchylek rozdílů voskových modelů při změně parametru času vstřikování



Jak vyplývá z grafické závislosti 1 při změně parametru času vstřikování z 90 na 30 vteřin se voskový model posouval jednoznačně do kladných hodnot. Maximální

Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

hodnoty odchylek jsou 0,27mm, vyskytly se však pouze ve dvou bodech CP3 a CP13, tudíž je zanedbáme. Lze tak říct, že se průměrná odchylka vosku pohybuje kolem 0,09mm. Z výsledné grafické závislosti tak dále vyplývá, že snížení času vstřikování má výrazný vliv na přesnost voskového modelu.

3.3.3.2 Čas dotlaku

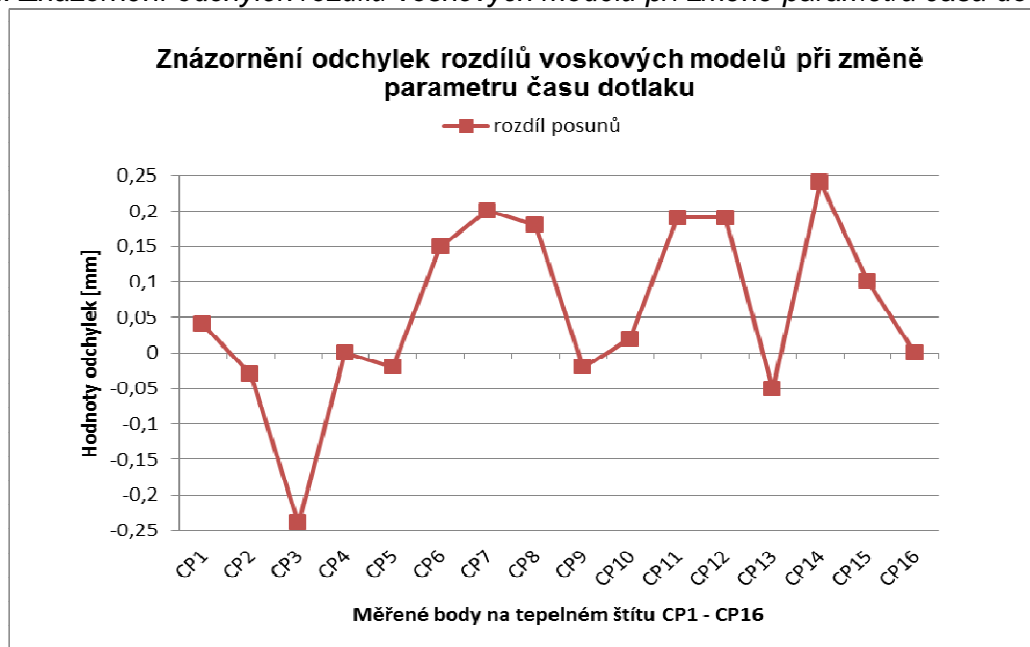
Tab. 7 Hodnoty vstřikovacího stroje při změně parametru času dotlaku

Číslo zkoušky	Teplota na modelárně [°C]	Teplota vosku v zásobníku [°C]	Teplota trysky [°C]	Vstřikovací tlak [bar]	Rychlost vstřikování	Čas vstřikování [s]	Čas dotlaku [s]	Čas chlazení [min]	Teplota chladicí vody [°C]	Použití přípravku
1 – 10	20	73	74	3	Max.	90	90	5	9	ANO
3 – ZK	20	73	74	3	Max.	90	30	5	9	ANO
4 – ZK	20	73	74	3	Max.	90	30	5	9	ANO

Tab. 8 Hodnoty odchylek voskových modelů při změně parametru času dotlaku

Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_1 - 10	-0,01	0,02	0,04	0,23	-0,19	-0,32	-0,21	-0,13	-0,21	-0,28	-0,24	-0,13	-0,14	-0,08	-0,28	0,00
3 - ZK	0,03	0,00	-0,36	0,35	-0,36	-0,19	-0,06	0,05	-0,30	-0,34	-0,08	0,04	-0,36	0,12	-0,16	0,00
4 - ZK	0,02	-0,02	-0,04	0,11	-0,06	-0,14	0,04	0,04	-0,15	-0,18	-0,01	0,08	-0,02	0,19	-0,20	0,00
Ø Z 3 a 4 ZK	0,03	-0,01	-0,20	0,23	-0,21	-0,17	-0,01	0,05	-0,23	-0,26	-0,05	0,06	-0,19	0,16	-0,18	0,00
Rozdíl posunů	0,04	-0,03	-0,24	0,00	-0,02	0,15	0,20	0,18	-0,02	0,02	0,19	0,19	-0,05	0,24	0,10	0,00

Graf 2: Znázornění odchylek rozdílů voskových modelů při změně parametru času dotlaku



Z grafické závislosti 2 lze konstatovat, že při změně parametru času dotlaku z 90 na 30 vteřin se odchylka rozdílů voskových modelů u osmi bodů pohybuje na



Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

hranici 0,2mm. Průměrně odchylka přesáhla přes 0,1mm. Lze tedy tvrdit, že snížením času dotlaku se nejvíce změnily nominální hodnoty zjištěné z předešlého měření. V porovnání s ostatními zkouškami měla hodnota času dotlaku na rozměrovou přesnost největší vliv, což potvrzuje i teorii.

3.3.3.3 Čas chlazení vosku ve fixačním přípravku

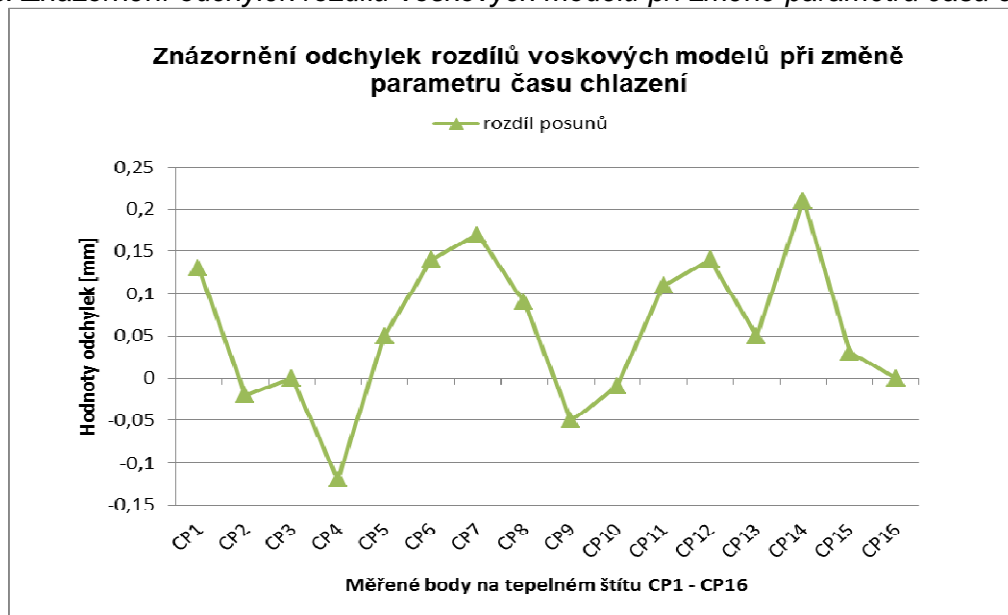
Tab. 9 Hodnoty vstřikovacího stroje při změně parametru času chlazení vosku ve fixačním přípravku

Číslo zkoušky	Teplota na modelárně [°C]	Teplota vosku v zásobníku [°C]	Teplota trysky [°C]	Vstřikovací tlak [bar]	Rychlost vstřikování	Čas vstřikování [s]	Čas dotlaku [s]	Čas chlazení [min]	Teplota chladicí vody [°C]	Použití přípravku
1 – 10	20	73	74	3	Max.	90	90	5	9	ANO
5 – ZK	20	73	74	3	Max.	90	90	2	9	ANO
6 – ZK	20	73	74	3	Max.	90	90	2	9	ANO

Tab. 10 Hodnoty odchylek voskových modelů při změně parametru času chlazení vosku ve fixačním přípravku

Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_1 - 10	-0,01	0,02	0,04	0,23	-0,19	-0,32	-0,21	-0,13	-0,21	-0,28	-0,24	-0,13	-0,14	-0,08	-0,28	0,00
5 – ZK	0,24	0,00	-0,01	0,13	-0,19	-0,20	-0,04	-0,03	-0,31	-0,36	-0,14	0,01	-0,17	0,14	-0,26	0,00
6 – ZK	-0,01	0,00	0,09	0,08	-0,08	-0,16	-0,03	-0,04	-0,21	-0,21	-0,11	0,01	-0,01	0,11	-0,23	0,00
ø Z 5 a 6 ZK	0,12	0,00	0,04	0,11	-0,14	-0,18	-0,04	-0,04	-0,26	-0,29	-0,13	0,01	-0,09	0,13	-0,25	0,00
Rozdíl posunů	0,13	-0,02	0,00	-0,12	0,05	0,14	0,17	0,09	-0,05	-0,01	0,11	0,14	0,05	0,21	0,03	0,00

Graf 3: Znázornění odchylek rozdílů voskových modelů při změně parametru času chlazení



Z grafické závislosti 3 plyne, že při změně parametru času chlazení z 5 na 2 minuty se u sedmi bodů odchylka rozdílů voskových modelů pohybuje v rozmezí 0,09 – 0,17mm. Průměrná odchylka pak byla kolem hodnoty 0,08mm, tato hodnota patří k menším v porovnání s ostatními zkouškami, ale nelze tvrdit, že by šlo čas chlazení úplně zanedbat.

3.3.3.4 Teplota chladicí vody, do které se vkládá fixační přípravek

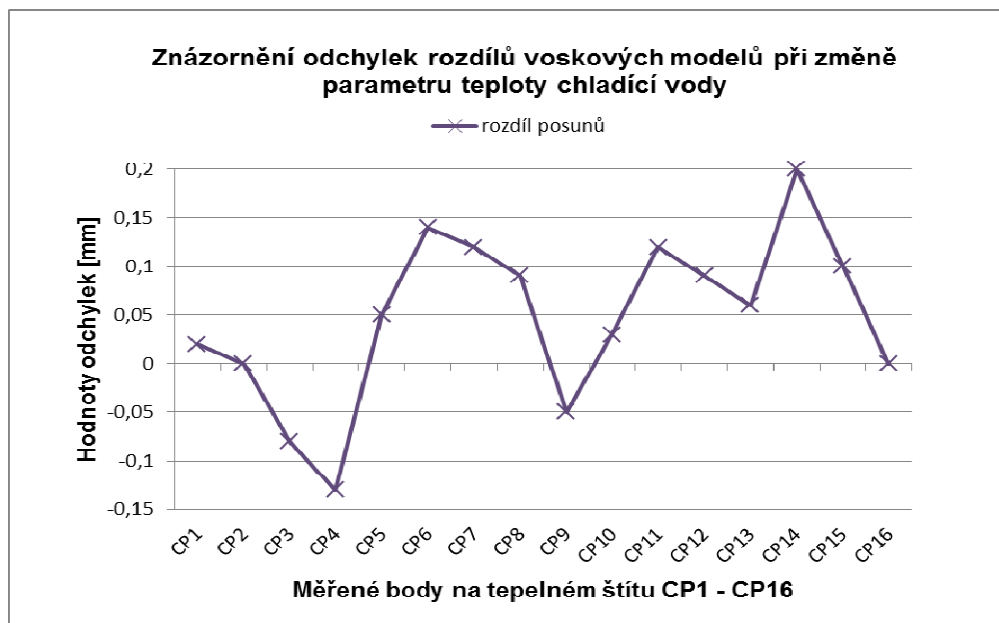
Tab. 11 Hodnoty vstřikovacího stroje při změně parametru teploty chladicí vody, do které se vkládá fixační přípravek

Číslo zkoušky	Teplota na modelárně [°C]	Teplota vosku v zásobníku [°C]	Teplota trysky [°C]	Vstřikovací tlak [bar]	Rychlost vstřikování	Čas vstřikování [s]	Čas dotlaku [s]	Čas chlazení [min]	Teplota chladicí vody [°C]	Použití přípravku
1 - 10	20	73	74	3	Max.	90	90	5	9	ANO
7 - ZK	20	73	74	3	Max.	90	90	5	15	ANO
8 - ZK	20	73	74	3	Max.	90	90	5	15	ANO

Tab. 12 Hodnoty odchylek voskových modelů při změně parametru teploty chladicí vody, do které se vkládá fixační přípravek

Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_1 - 10	-0,01	0,02	0,04	0,23	-0,19	-0,32	-0,21	-0,13	-0,21	-0,28	-0,24	-0,13	-0,14	-0,08	-0,28	0,00
7 - ZK	0,01	0,01	-0,02	0,13	-0,12	-0,19	-0,05	-0,02	-0,24	-0,20	-0,15	-0,02	-0,02	0,21	-0,24	0,00
8 - ZK	0,01	0,02	-0,06	0,06	-0,15	-0,17	-0,13	-0,06	-0,27	-0,29	-0,09	-0,06	-0,14	0,02	-0,12	0,00
ø 2 7 a 8 ZK	0,01	0,02	-0,04	0,10	-0,14	-0,18	-0,09	-0,04	-0,26	-0,25	-0,12	-0,04	-0,08	0,12	-0,18	0,00
Rozdíl posunů	0,02	0,00	-0,08	-0,13	0,05	0,14	0,12	0,09	-0,05	0,03	0,12	0,09	0,06	0,20	0,10	0,00

Graf 4: Znázornění odchylek rozdílů voskových modelů při změně parametru teploty chladicí vody



Grafická závislost 4 ukazuje, že při změně parametru teploty chladicí vody z 9 na 15°C se u sedmi bodů odchylka rozdílů voskových modelů pohybuje v rozmezí 0,08 – 0,14mm. Průměrná odchylka se pohybuje kolem hodnoty 0,08mm stejně jako u času chlazení. Tyto dvě zkoušky mají stejný charakter výsledných křivek a pravděpodobně i dost podobný význam na změnu rozměrové přesnosti voskových modelů.

3.3.3.5 Vstřikovací tlak

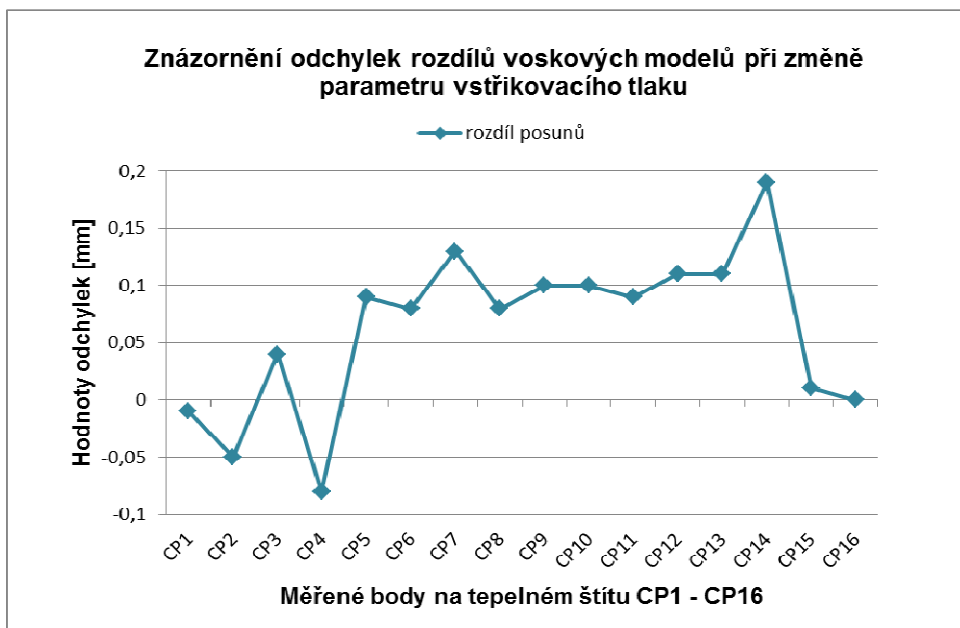
Tab. 13 Hodnoty vstřikovacího stroje při změně parametru vstřikovacího tlaku

Číslo zkoušky	Teplota na modelárně [°C]	Teplota vosku v zásobníku [°C]	Teplota trysky [°C]	Vstřikovací tlak [bar]	Rychlost vstřikování	Čas vstřikování [s]	Čas dotlaku [s]	Čas chlazení [min]	Teplota chladicí vody [°C]	Použití přípravku
1 - 10	20	73	74	3	Max.	90	90	5	9	ANO
9 - ZK	20	73	74	1	Max.	90	90	5	9	ANO
10 - ZK	20	73	74	1	Max.	90	90	5	9	ANO

Tab. 14 Hodnoty odchylek voskových modelů při změně parametru vstřikovacího tlaku

Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_1 - 10	-0,01	0,02	0,04	0,23	-0,19	-0,32	-0,21	-0,13	-0,21	-0,28	-0,24	-0,13	-0,14	-0,08	-0,28	0,00
9 - ZK	-0,01	-0,04	0,11	0,16	-0,10	-0,26	-0,08	-0,08	-0,12	-0,20	-0,17	-0,03	-0,02	0,11	-0,29	0,00
10 - ZK	-0,02	-0,02	0,04	0,14	-0,09	-0,21	-0,07	-0,01	-0,10	-0,16	-0,12	-0,01	-0,03	0,11	-0,24	0,00
ø Z 9 a 10 ZK	-0,02	-0,03	0,08	0,15	-0,10	-0,24	-0,08	-0,05	-0,11	-0,18	-0,15	-0,02	-0,03	0,11	-0,27	0,00
Rozdíl posunů	-0,01	-0,05	0,04	-0,08	0,09	0,08	0,13	0,08	0,10	0,10	0,09	0,11	0,11	0,19	0,01	0,00

Graf 5: Znázornění odchylek rozdílů voskových modelů při změně parametru vstřikovacího tlaku



Z grafické závislosti 5 vyplývá, že se při změně parametru vstřikovacího tlaku ze 3 na 1 bar hodnota naměřené odchylky u deseti bodu pohybuje okolo 0,1mm, což je poměrně jasný fakt, který naznačuje, že pokud se sníží vstřikovací tlak, dostane se nepřesný voskový model, který se jednoznačně vzdaluje od nominálních hodnot. U této zkoušky hraje velikou roli také fakt, že na voskových modelech byly viditelné stopy po proudění vosku. O takto vyrobených voskových modelech lze říct, že jsou nepoužitelné pro další výrobu přesných odlitků.

3.3.3.6 Teplota vstřikovací trysky

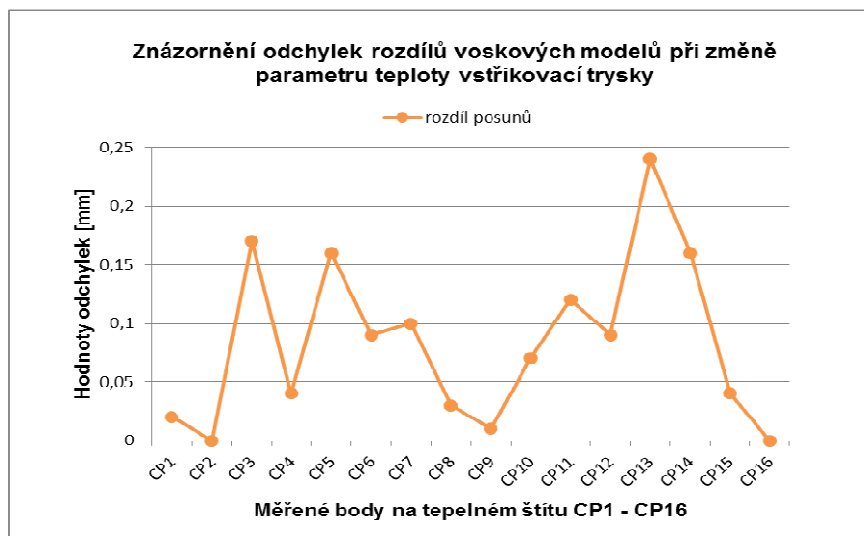
Tab. 15 Hodnoty vstřikovacího stroje při změně parametru teploty vstřikovací trysky

Číslo zkoušky	Teplota na modelárně [°C]	Teplota vosku v zásobníku [°C]	Teplota trysky [°C]	Vstřikovací tlak [bar]	Rychlost vstřikování	Čas vstřikování [s]	Čas dotlaku [s]	Čas chlazení [min]	Teplota chladicí vody [°C]	Použití přípravku
1 - 10	20	73	74	3	Max.	90	90	5	9	ANO
11 - ZK	20	73	70	3	Max.	90	90	5	9	ANO
12 - ZK	20	73	70	3	Max.	90	90	5	9	ANO

Tab. 16 Hodnoty odchylek voskových modelů při změně parametru teploty vstřikovací trysky

Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_1 - 10	-0,01	0,02	0,04	0,23	-0,19	-0,32	-0,21	-0,13	-0,21	-0,28	-0,24	-0,13	-0,14	-0,08	-0,28	0,00
11 - ZK	0,01	0,04	0,19	0,35	-0,09	-0,24	-0,17	-0,16	-0,22	-0,25	-0,11	-0,10	0,01	-0,05	-0,16	0,00
12 - ZK	0,00	0,00	0,22	0,19	0,04	-0,21	-0,05	-0,03	-0,17	-0,17	-0,13	0,02	0,18	0,20	-0,31	0,00
Ø Z 11 a 12 ZK	0,01	0,02	0,21	0,27	-0,03	-0,23	-0,11	-0,10	-0,20	-0,21	-0,12	-0,04	0,10	0,08	-0,24	0,00
Rozdíl posunů	0,02	0,00	0,17	0,04	0,16	0,09	0,10	0,03	0,01	0,07	0,12	0,09	0,24	0,16	0,04	0,00

Graf 6: Znázornění odchylek rozdílů voskových modelů při změně parametru teploty vstřikovací trysky



Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

Z grafické závislosti 6 je na první pohled patrné, že při změně parametru teploty trysky vstřikovacího lisu z 74°C na 70°C se všechny hodnoty odchylek voskových modelů pohybují v kladné oblasti grafické závislosti, přičemž průměrná odchylka dosahovala hodnot lehce přes 0,08mm. Větší roli zahrál opět fakt, že se na voskových modelech znovu objevily stopy po proudění vosku, které nevyhovují podmínkám pro další fázi výroby. To je jednoznačný důvod, který říká, že by teplota trysky neměla klesnout pod doporučenou hranici, která je v tomto případě 73°C.

3.3.3.7 Teplota trysky a vstřikovací tlak

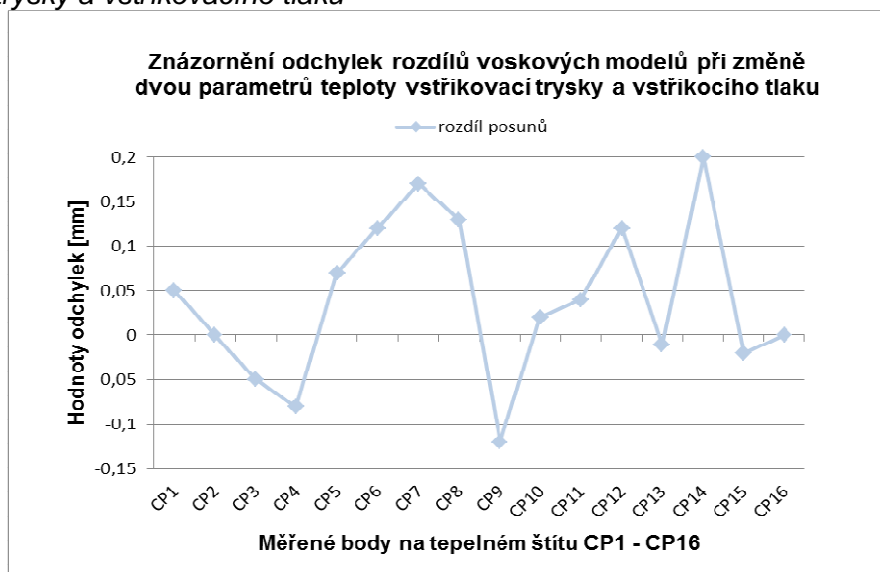
Tab. 17 Hodnoty vstřikovacího stroje při změně parametru teploty trysky a vstřik. tlaku

Číslo zkoušky	Teplota na modelárně [°C]	Teplota vosku v zásobníku [°C]	Teplota trysky [°C]	Vstřikovací tlak [bar]	Rychlost vstřikování	Čas vstřikování [s]	Čas dotlaku [s]	Čas chlazení [min]	Teplota chladicí vody [°C]	Použití přípravku
1 - 10	20	73	74	3	Max.	90	90	5	9	ANO
13 - ZK	20	73	70	4,5	Max.	90	90	5	9	ANO
14 - ZK	20	73	70	4,5	Max.	90	90	5	9	ANO

Tab. 18 Hodnoty odchylek voskových modelů při změně parametru teploty trysky a vstřikovacího tlaku

Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_1 - 10	-0,01	0,02	0,04	0,23	-0,19	-0,32	-0,21	-0,13	-0,21	-0,28	-0,24	-0,13	-0,14	-0,08	-0,28	0,00
13 - ZK	0,03	0,01	-0,03	0,18	-0,14	-0,20	-0,07	0,00	-0,30	-0,10	-0,25	0,02	-0,17	0,10	-0,33	0,00
14 - ZK	0,04	0,02	0,01	0,12	-0,10	-0,20	-0,01	0,00	-0,35	-0,42	-0,15	-0,03	-0,13	0,14	-0,26	0,00
Ø Z 13 a 14 ZK	0,04	0,02	-0,01	0,15	-0,12	-0,20	-0,04	0,00	-0,33	-0,26	-0,20	-0,01	-0,15	0,12	-0,30	0,00
Rozdíl posunů	0,05	0,00	-0,05	-0,08	0,07	0,12	0,17	0,13	-0,12	0,02	0,04	0,12	-0,01	0,20	-0,02	0,00

Graf 7: Znázornění odchylek rozdílů voskových modelů při změně dvou parametrů: teploty vstřikovací trysky a vstřikovacího tlaku



U poslední zkoušky se změnila dva parametry - teplota trysky a vstřikovací tlak. Přesto, že předchozí zkouška jasně prokázala, že by teplota trysky neměla klesnout pod 73 °C, následující zkouška ukázala, že pokud se teplota trysky sníží a zároveň se zvýší vstřikovací tlak, přestává být teplota trysky kritickým parametrem. Dokonce se odchylka rozdílů voskových modelů pohybuje na hranici 0,07mm, což je nejmenší odchylka ze všech provedených zkoušek.

Tab. 19 Průměrných odchylek voskových modelů

č.	číslo zkoušky	číslo vosků	aritmetický Ø rozdílu posunů v mm	měřený parametr
1	7	13 a 14	0,075	teplota trysky a vstřik. tlak
2	4	7 a 8	0,081	teplota chladicí vody
3	5	9 a 10	0,082	vstřikovací tlak
4	3	5 a 6	0,083	čas chlazení
5	6	11 a 12	0,083	teplota trysky
6	1	1 a 2	0,098	čas vstřikování
7	2	3 a 4	0,104	čas dotlaku

3.4 3D MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ ATOS COMPACT SCAN V PRAXI [8], [9], [15], [16]

Pro veškeré účely skenování voskových modelů se použil 3D skener Atos Compact Scan 2M, který vlastní slévárna Prague Casting Services, a.s. Hlavní parametry skeneru jsou uvedeny v tabulce 20. Podrobný popis zařízení, princip skenování a vyhodnocování voskových modelů jsou uvedeny v závěru této práce v kapitolách 3.4.1, 3.4.2 a 3.4.3.

Tab. 20 Přehled hlavních parametrů 3D skeneru

Systém	ATOS Compact Scan 2M
Rozlišení CCD čipu	2 x 2 000 000
Plocha měření (mm²)	40 x 30 - 1000 x 800
Hustota bodů (mm)	0,02 - 0,62
Počet naměřených bodů na jeden záběr	2 miliony
Technologie modrého světla	ANO

3.4.1 Princip a použití 3D skeneru

ATOS GOM SCAN je průmyslový optický 3D skener s vysokým rozlišením. Rychle a přesně poskytuje data z trojrozměrného měření, což umožňuje optimalizaci konstrukčních prací a zlepšování výrobních procesů. Systém ATOS je široce využíván pro měření dílů v různých průmyslových odvětvích. Patří sem plechové výlisky, formy a lisovací nástroje, turbínové lopatky a rozváděcí segmenty, prototypy, plastové výlisky a v neposlední řadě také přesné odlitky. Geometrie celého dílu je naskenována v podobě husté sítě bodů nebo polygonální sítě, které přesně popisují povrch objektu a jeho základní tvary.

Zařízení je vybaveno dvěma kamerami a jedním projektorem, který na měřený povrch promítá rastr, který kamery snímají. Jednotlivé snímky jsou automaticky skládány pomocí inteligentního algoritmu založeného na kombinaci referenčních bodů. Po naskenování celého povrchu snímaného dílu vznikne polygonální síť tzv. 3D mrak bodů, který se následně vyexportuje nejčastěji do formátu stl dat a porovnává se se zákazníkem požadovaným 3D modelem „nominálním kusem“. Dosahované přesnosti u měření optickým skenerem jsou v závislosti na použitých měřicích objemech tj., jak velký povrch se najednou snímá - u malých měřicích objemů se lze dostat na přesnost až na 0,01, u těch větších měřicích objemů se s přesností měření lze dostat na 0,05.

Systém ATOS dokáže změřit objekty různých velikostí, s různými povrchovými úpravami a různé složitosti. Z tohoto důvodu se používá takřka ve všech průmyslových odvětvích výroby na celém světě.

Systém ATOS poskytuje všestrannost 3D digitalizace, protože nabízí:

- Přesné 3D souřadnice a vysoce kvalitní data
- Parametrickou inspekci a vyhodnocení
- Odchylku celého povrchu vůči CAD, 2D a mezi jednotlivými díly
- Analýzu založenou na řezech, tolerance tvaru a polohy a trendovou analýzu



Obr. 44 Automobilový průmysl [16]



Obr. 45 Letectví [16]



Obr. 46 Robotizované skenovací pracoviště
[16]



Obr. 47 Skenování dopravního letadla [16]

3.4.2 Skenování voskového modelu a kovového dílu [8], [9], [15], [16]

Ke skenování dílů slouží software ATOS Professional, který provádí operátora celým procesem skenování. Před začátkem samotného skenování se měřicí systém musí zkalibrovat pomocí normovaných destiček. Po kalibraci se musí připravit skenované díly, tzn. polepit je referenčními body, pomocí kterých se následně skládá 3D obraz. Jednotlivé body se na díl umísťují tak, aby při každém snímku byly viditelné pro obě kamery minimálně tři body. Referenční body jsou také umístěny na rotačním stole, na který se skenovaný díl pokládá a skenuje. Čím více bodů je při pořizování snímků vidět, tím je měření přesnější.

Voskové modely jsou při skenování příliš lesklé, z toho důvodu se na ně musí nanášet prášková křída, aby nedocházelo ke zkreslení při skenování. Oproti tomu hotové kovové díly lze před skenováním upravit tryskáním tak, aby byly matné, a tak se na ně prášková křída nanášet nemusí a proces přípravy je rychlejší. I z toho



Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

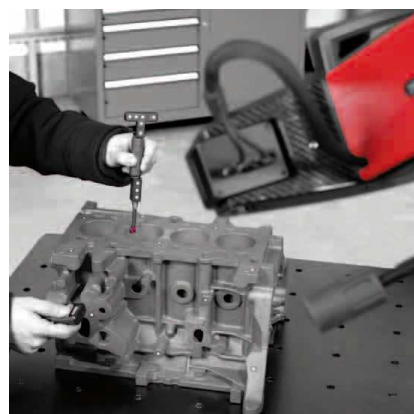
důvodu, že při skenování voskových modelů musí operátor postupovat opatrně, aby vosk neporušil, což se u kovu stát nemůže.

Takto připravený díl se položí na rotační stůl, který je propojen se softwarem ATOS a je plně automatizován. Při pořizování jednotlivých skenů se rotační stůl otáčí o námi definovanou hodnotu. Jednotlivé skeny jsou automaticky skládány pomocí inteligentního algoritmu založeného na kombinaci referenčních bodů nebo spojováním naskenovaného tvaru. Při skenování musí dát operátor pozor, aby se skenovaný díl nepohnul vůči rotačnímu stolu – došlo by tak ke změnám vazeb mezi referenčními body a celé měření by bylo nepoužitelné. Při měření může operátor pohybovat pouze se skenerem, který je umístěn na teleskopickém stativu, viz obr. 47. V automatizovaném provozu je stativ nahrazován robotem, viz obr. 46.

Po seskenování měřeného dílu se softwarově povrch vyhladí pomocí tzv. polygonizace, viz obr. 52 a vytvoří se formát stl., se kterým se následně porovnávají nominální 3D data v programu ATOS GOM *INSPECT Professional*.



Obr. 48 Skenování výlisků [16]



Obr. 49 Skenování děr v odlitcích [16]



Obr. 50 Skenování vývojových dílů [16]



Obr. 51 Skenování otryskaných odlitků [16]



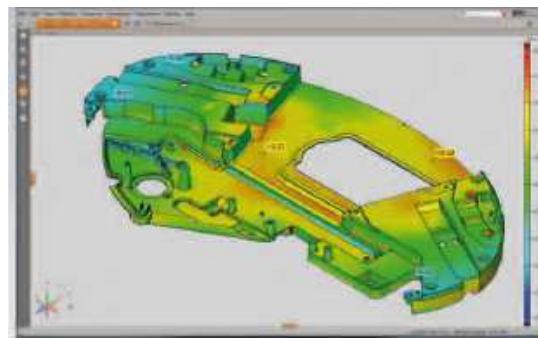
3.4.3 Vyhodnocování výsledků v programu ATOS GOM INSPECT Professional [8], [9], [15], [16]

Pomocí programu ATOS GOM INSPECT Professional se naskenovaná data spojí s nominálním 3D modelem.

Od načtení CAD dat až po vytvoření protokolu obsahuje software ATOS Professional veškeré vyhodnocovací nástroje pro rozsáhlou analýzu jednotlivých dílů a sestav. Software ATOS Professional obsahuje parametrickou inspekci. Všechny úkony a vyhodnocovací kroky jsou plně výsledovatelné a propojené a lze je snadno měnit a upravovat.



Obr. 52 Výpočet polygonální sítě – polygonizace [16]



Obr. 53 3D analýza [16]

3.4.4 Výhody 3D skeneru oproti souřadnicovému systému [8], [9], [15], [16]

Hlavní výhoda oproti 3D dotykovému měření je jeho rychlost, a tudíž lze prakticky ihned vidět dosažené výsledky. Jelikož se zařízení skládá pouze ze skenovací hlavy a výkonného počítače, může se tedy poměrně snadno přenášet. Ve srovnání s dotykovými, měřicími přístroji je optický skener méně citlivý na prach. Lze ho tedy snadno použít i ve výrobě pro průmyslové měření.

4. ZHODNOCENÍ – DISKUZE

V první části po nastavení vstřikolisu se odlisovalo 7 voskových modelů, které se po 12 hodinách změřily na 3D optickém skeneru ATOS. Ze sedmi voskových modelů byly vybrány dva, které se rozměry přiblížily nominálním hodnotám voskového modelu. Z daných vosků se vyrobily dva kovové díly, které se opět změřily na optickém skeneru a po stanovení společných 16-ti bodů na vosku a na kovu vznikla srovnávací tabulka, ve které byly zjištěny posuny pro nastavení fixačního přípravku. Posuny vosku se pohybovaly v rozmezí $\pm 0,7\text{mm}$ v pěti bodech. Po diskusi se zaměstnanci ve slévárně Prague Casting Services a.s. bylo zhodnoceno nastavení přípravku a samotný posun vosku jako standardní. V PCS mají zkušenosti, že se běžně nastavuje okolo čtyř až šesti hodnot v závislosti na složitosti dílu a posuny vosku a kovu se pohybují kolem $0,5\text{mm}$.

Po nastavení přípravku následovalo lisování dalších 10ks voskových modelů, na kterých se ověřovala stabilita výroby. Získané hodnoty se zprůměrovaly a použily pro srovnání při lisování při změněných technologických parametrech.

Sledování vlivu hlavních technologických parametrů výroby voskového modelu pro přesné lití probíhalo ve slévárně přesného lití Prague Casting Services a.s. Na vstřikolisu se sledovaly následující technologické parametry: teplota trysky, vstřikovací tlak, čas vstřikování a čas dotlaku. Další dva parametry se sledovaly po vyjmutí voskového modelu z kovové formy tj. čas chlazení a teplota chladícího média.

Při vstřikování odlišných technologických parametrů se použily hodnoty ze standardního vstřikovacího cyklu a vždy se změnila pouze jedna hodnota. Pro tuto změnu se odlisovaly vždy dva voskové modely, které se opět skenovaly. Z výsledných hodnot se vzala průměrná hodnota pro vyhodnocení. Celkem se pro měření odlisovalo dalších 14 kusů voskových modelů.

Celkově se provedlo sedm různých zkoušek při odlišných parametrech vstřikování, ze kterých vzniklo sedm grafických závislostí, ve kterých se sledovaly rozdíly odchylek voskových modelů. Ihned po odlisování bylo patrné, že při sníženém vstřikovacím tlaku a snížené teplotě trysky jsou voskové modely nevyhovující. Na voskových modelech byly viditelné stopy po proudění vosku, což je z hlediska další výroby nepřijatelné. Po vyhodnocení jednotlivých zkoušek se pomocí grafických



Katedra strojírenské technologie

Adam Černoch

závislostí zjistilo, že největší vliv na rozměrovou přesnost voskového modelu měl vstřikovací tlak a čas dotlaku. Stále se však musí mít na paměti, že spolu veškeré technologické parametry při výrobě voskových modelů úzce souvisí a volby jednotlivých parametrů se musí volit v závislosti na ostatních parametrech výroby voskového modelu.

5. ZÁVĚR

Stanovení deformačních charakteristik soustavy vosk – kov

V první fázi experimentální části se zjišťovala vlastní závislost soustavy vosk - kov a ze zjištěných výsledků se nastavil fixační přípravek. Ten následně předdeformoval vosk natolik, aby se při další výrobě daného dílu vyrobil odlitek, který bude rozměrově splňovat požadavky zákazníka. Celkově se fixační přípravek posouval v pěti bodech CP4, CP6, CP10, CP11 a v bodě CP15, jak ukazuje tabulka 3 resp. 21. Po přenastavení přípravku se odlisovala ověřovací dávka deseti voskových modelů, u kterých lze tvrdit, že v daných bodech jsou patrné požadované změny předdeformace.

U zkoumaného dílu, což byl v případě diplomové práce tepelný štít pozemní plynové turbíny, došlo k největším posunům mezi voskovým modelem a kovovým dílem v pěti bodech a to v průměru o 0,6mm. Obecně lze potvrdit fakt, že vzájemný posun při výrobě přesných odlitků vyráběných metodou na vytavitelný model mezi voskem a kovem je v několika desetinách milimetrů. Velikost posunu je ovšem ovlivněna závislostí na tvarech, rozměrech vyráběného dílu a použité technologii výroby přesně litých odlitků.

Tab. 21 Hodnoty odchylek od nominálních dat pro vosky a kovy

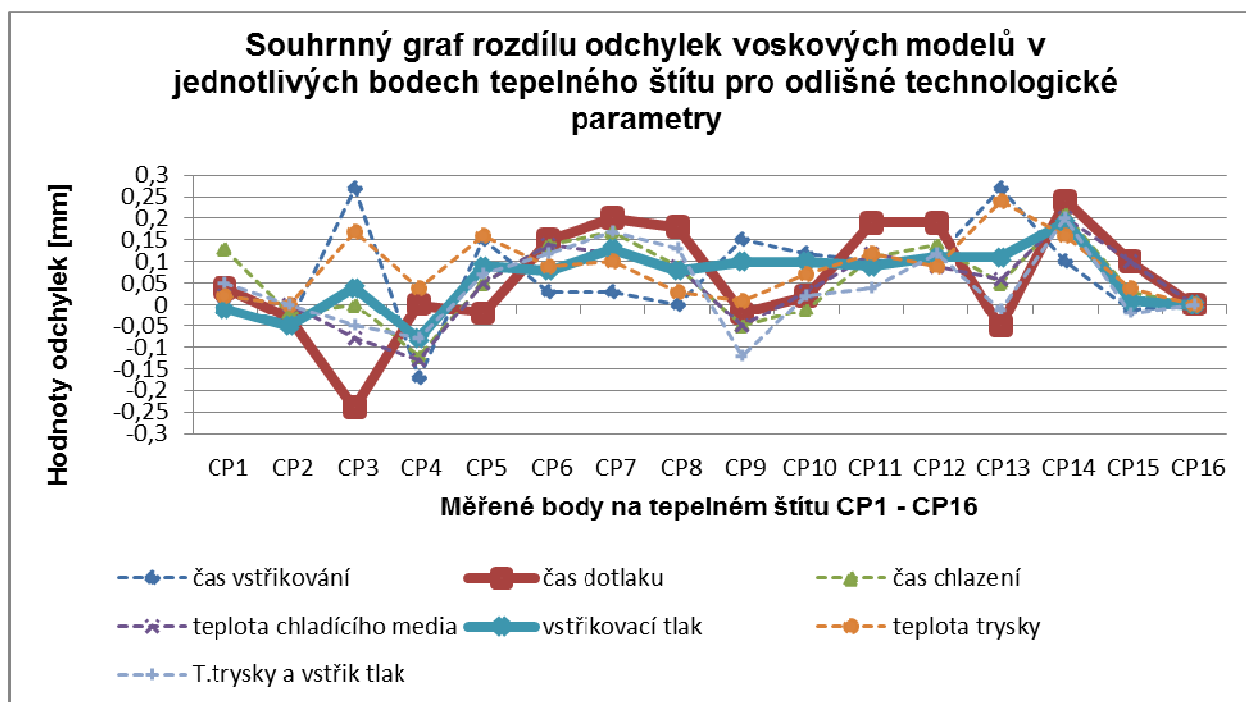
Číslo zkoušky	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
VOSK_3P	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04	-0,09	-0,02	-0,02	-0,05	-0,15	-0,02	0,09	-0,03	-0,07	0,08	0,08	0,00
VOSK_6P	0,00	-0,02	-0,04	-0,04	-0,16	-0,07	-0,05	-0,06	-0,21	-0,03	0,06	-0,05	-0,08	0,06	0,05	0,00
Ø Ze 2 vosků	-0,01	-0,02	-0,04	-0,04	-0,13	-0,05	-0,04	-0,06	-0,18	-0,03	0,08	-0,04	-0,08	0,07	0,07	0,00
KOV_3P	-0,05	-0,03	-0,18	-0,78	0,16	0,53	0,16	-0,08	0,22	0,60	0,71	0,21	-0,15	0,15	0,85	0,00
KOV_6P	0,00	-0,04	-0,14	-0,68	0,02	0,62	0,25	-0,09	0,21	0,55	0,78	0,19	-0,33	0,27	0,80	0,00
Ø Ze 2 kovů	-0,03	-0,04	-0,16	-0,73	0,09	0,58	0,21	-0,09	0,22	0,58	0,75	0,20	-0,24	0,21	0,83	0,00
Největší posuny				-0,73		0,58				0,58	0,75				0,73	
Posun přípravku				0,7		-0,6				-0,6	-0,7				-0,7	

Vliv technologických parametrů na přesnost tepelného štítu

Zhodnocením provedených experimentů se prokázalo, že největší vliv na tvarovou a rozměrovou přesnost voskových modelů má první část výroby tepelného štítu tj. vstřikování dílů do dutiny kovové formy. Druhá část chlazení voskového modelu ovlivňuje proces méně. U pozorovaných parametrů má na přesnost výrazný vliv čas dotlaku a vstřikovací tlak. Pokud se sníží teplota trysky, dostane se další parametr, který stejně jako dva již zmíněné parametry ovlivňují přesnost výroby voskového modelu, viz souhrnná grafická závislost 8. Je však nutno zdůraznit, že pro výrobu voskových modelů je potřeba volit jednotlivé parametry v souladu s ostatními neboť jsou jednotlivé technologické parametry vzájemně provázány a ovlivňují výslednou kvalitu voskového modelu jako souhrnný celek.

Při případném dalším zkoumání vlivu technologických parametrů na výslednou kvalitu a přesnost voskových modelů by se dalo hlouběji zaměřit na jednotlivé kombinace parametrů konkrétně na vstřikovací tlak a teplotu vstřikovací trysky. Výběrem vhodné kombinace bylo totiž v poslední zkoušce dokázáno, že se dají odlisovat voskové modely, které měly nejmenší odchylku od nominálních dat.

Graf 8: Souhrnná grafická závislost rozdílů odchylek voskových modelů pro odlišné technologické parametry



6. SEZNAMY

6.1 SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1 BRONZOVÁ FIGURA TANEČNICE (INDIE ~3000 PŘ.N.L.) [4]	11
OBR. 2 BRONZOVÁ SOŠKA BÝČKA, Z OBDOBÍ (700 – 450 PŘ. N. L.), [5]	11
OBR. 3 ASPEKTY PŘESNOSTI U ODLITKU [3]	11
OBR. 4 SCHÉMA VÝROBY ODLITKŮ METODOU NA VYTAVITELNÝ MODEL [3]	13
OBR. 5 SCHÉMA VSTŘIKOLISU PRO VÝROBU VOSKOVÝCH MODELŮ [3]	14
OBR. 6 SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ VOSKOVÉHO STROMEČKU [3]	15
OBR. 7 UKÁZKA MODERNÍHO AUTOKLÁVU OD FIRMY LBBC [18]	17
OBR. 8 ZAVEŽENÉ SKOŘEPINY DO AUTOKLÁVU [17]	17
OBR. 9 VÝPAL SKOŘEPIN [17]	18
OBR. 10 KERAMICKÉ JÁDRO TVOŘÍCÍ DUTINU ODLITKU [9]	19
OBR. 11 VOSKOVÉ SMĚSI [3]	21
OBR. 12 PŘÍKLADY DSC KŘIVEK PRO RŮZNÉ TYPY VZORKŮ [21]	23
OBR. 13 SCHÉMA INTERFEROMETRU [22]	24
OBR. 14 BODU TUHNUTÍ [19]	25
OBR. 15 VISKOZITA [20]	26
OBR. 16 ZKOUŠKA TEČENÍ VOSKU [21]	27
OBR. 17 DIGITÁLNÍ DRSNOMĚR [17]	28
OBR. 18 ATOS SKEN 3D [16]	29
OBR. 19 ATOS SKEN 3D [16]	29
OBR. 20 ATOS SKEN 3D [16]	29
OBR. 21 ATOS SKEN 3D [16]	29
OBR. 22 RTG PŘÍSTROJEM PHILIPS MG 452 [17]	30
OBR. 23 3D MODEL HLINÍKOVÉ FORMY PRO DÍL 19-S-12 [9]	32
OBR. 24 HLINÍKOVÁ FORMA PRO DÍL 19-S-12 [9]	32
OBR. 25 3D MODEL VOSKOVÉHO STROMEČKU 19-S-12 [9]	33
OBR. 26 SIBRALOVÝ ZÁBAL SKOŘEPINY DÍLU	34
OBR. 27 SIBRALOVÁ VATA [9]	34
OBR. 28 PRŮBĚH TEPLIT PO ODLITÍ DÍLU 19-S-12 V PROGRAMU PROCAST [9]	35
OBR. 29 3D MODEL FIXAČNÍHO PŘÍPRAVKU [9]	37
OBR. 30 FIXAČNÍ PŘÍPRAVEK „WAX REFORMER“ [9]	37
OBR. 31 VOSKOVÝ STROMEČEK DÍLU 19-S-12 [9]	37
OBR. 32 VÝROBA KERAMICKÉ FORMY [9]	38
OBR. 33 OTRYSKANÝ ODLITÝ STROMEČEK [9]	38
OBR. 34 PRŮBĚH TLAKU V DUTINĚ FORMY BĚHEM PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ VOSK. MODELU [4]	39
OBR. 35 ZAVEŠENÍ LOPATEK NA STOJANU ZA ZÁMKOVOU ČÁST [9]	42
OBR. 36 POSTUP VYJMUTÍ VOSKOVÉHO MODELU Z DUTINY FORMY [9]	45
OBR. 37 POSTUP ZAKLÁDÁNÍ VOSKU DO FIXAČNÍHO PŘÍPRAVKU A CHLADÍCÍ VODY [9]	46
OBR. 38 USTAVENÍ VOSKOVÉHO MODELU PO VYJMUTÍ Z FIXAČNÍHO PŘÍPRAVKU [9]	47



Katedra strojírenské technologie	Adam Černoch
OBR. 39 ROZMÍSTĚNÍ MĚŘÍCÍCH BODŮ PRO STANOVENÍ ZÁVISLOSTI POSUNŮ VOSK – KOV [9]	47
OBR. 40 BAREVNÁ MAPA PRO VOSK 3P [9]	48
OBR. 41 BAREVNÁ MAPA PRO VOSK 6P [9]	48
OBR. 42 BAREVNÁ MAPA PRO KOV 3P [9]	49
OBR. 43 BAREVNÁ MAPA PRO KOV 6P [9]	49
OBR. 44 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL [16]	60
OBR. 45 LETECTVÍ [16]	60
OBR. 46 ROBOTIZOVANÉ SKENOVACÍ PRACOVNÍŠTĚ [16]	60
OBR. 47 SKENOVÁNÍ DOPRAVNÍHO LETADLA [16]	60
OBR. 48 SKENOVÁNÍ VÝLISKŮ [16]	61
OBR. 49 SKENOVÁNÍ DĚR V ODLITCÍCH [16]	61
OBR. 50 SKENOVÁNÍ VÝVOJOVÝCH DÍLŮ [16]	61
OBR. 51 SKENOVÁNÍ OTRYSKANÝCH ODLITKŮ [16]	61
OBR. 52 VÝPOČET POLYGONÁLNÍ SÍTĚ – POLYGONIZACE [16]	62
OBR. 53 3D ANALÝZA [16]	62

6.2 SEZNAM GRAFŮ

GRAF 1:ZNÁZORNĚNÍ ODCHYLEK ROZDÍLŮ VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU ČASU VSTŘIKOVÁNÍ	51
GRAF 2: ZNÁZORNĚNÍ ODCHYLEK ROZDÍLŮ VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU ČASU DOTLAKU	52
GRAF 3: ZNÁZORNĚNÍ ODCHYLEK ROZDÍLŮ VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU ČASU CHLAZENÍ	53
GRAF 4: ZNÁZORNĚNÍ ODCHYLEK ROZDÍLŮ VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU TEPLoty CHLADÍCÍ VODY	54
GRAF 5: ZNÁZORNĚNÍ ODCHYLEK ROZDÍLŮ VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU VSTŘIKOVACÍHO TLAKU	55
GRAF 6: ZNÁZORNĚNÍ ODCHYLEK ROZDÍLŮ VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU TEPLoty VSTŘIKOVACÍ TRYSKY	56
GRAF 7: ZNÁZORNĚNÍ ODCHYLEK ROZDÍLŮ VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ DVOU PARAMETRŮ: TEPLoty VSTŘIKOVACÍ TRYSKY A VSTŘIKOVACÍHO TLAKU	57
GRAF 8: SOUHRNNÁ GRAFICKÁ ZÁVISLOST ROZDÍLŮ ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ PRO ODLIŠNÉ TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY	65

6.3 SEZNAM TABULEK

TAB. 1 SOUHRNNÁ TABULKA PROVEDENÝCH ZKOUŠEK	43
TAB. 2 HODNOTY VSTŘIKOVACÍHO STROJE PRO LISOVÁNÍ VOSKOVÝCH MODELŮ Č. 1P – 7P	44
TAB. 3 HODNOTY ODCHYLEK OD NOMINÁLNÍCH DAT PRO VOSKY A PRO KOVY	50
TAB. 4 HODNOTY ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ, NA KTERÝCH BYL POUŽIT PŘEDNASTAVENÝ FIXAČNÍ PŘÍPRAVEK	50
TAB. 5 HODNOTY VSTŘIKOVACÍHO STROJE PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU ČASU VSTŘIKOVÁNÍ	51
TAB. 6 HODNOTY ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU ČASU VSTŘIKOVÁNÍ	51
TAB. 7 HODNOTY VSTŘIKOVACÍHO STROJE PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU ČASU DOTLAKU	52
TAB. 8 HODNOTY ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU ČASU DOTLAKU	52
TAB. 9 HODNOTY VSTŘIKOVACÍHO STROJE PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU ČASU CHLAZENÍ VOSKU VE FIXAČNÍM PŘÍPRAVKU	53
TAB. 10 HODNOTY ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU ČASU CHLAZENÍ VOSKU VE FIXAČNÍM PŘÍPRAVKU	53
TAB. 11 HODNOTY VSTŘIKOVACÍHO STROJE PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU TEPLoty CHLADÍCÍ VODY, DO KTERÉ SE VKLÁDÁ FIXAČNÍ PŘÍPRAVEK	54
TAB. 12 HODNOTY ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU TEPLoty CHLADÍCÍ VODY, DO KTERÉ SE VKLÁDÁ FIXAČNÍ PŘÍPRAVEK	54
TAB. 13 HODNOTY VSTŘIKOVACÍHO STROJE PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU VSTŘIK. TLAKU	55
TAB. 14 HODNOTY ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU VSTŘIK. TLAKU	55
TAB. 15 HODNOTY VSTŘIKOVACÍHO STROJE PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU TEPLoty VSTŘIK. TRYSKY	56
TAB. 16 HODNOTY ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU TEPLoty VSTŘIK. TRYSKY	56
TAB. 17 HODNOTY VSTŘIKOVACÍHO STROJE PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU TEPLoty TRYSKY A VSTŘIK. TLAKU	57
TAB. 18 HODNOTY ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ PŘI ZMĚNĚ PARAMETRU TEPLoty TRYSKY A VSTŘIK. TLAKU	57
TAB. 19 PRŮMĚRNÝCH ODCHYLEK VOSKOVÝCH MODELŮ	58
TAB. 20 PŘEHLED HLAVNÍCH PARAMETRŮ 3D SKENERU	58
TAB. 21 HODNOTY ODCHYLEK OD NOMINÁLNÍCH DAT PRO VOSKY A KOVY	64

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., HOUŠŤ, M., PAVELKA, M.: Výroba přesných odlitků, Praha, 1976.
- [2] DOŠKÁŘ, J., KRUMPOLC, V.: Novodobé způsoby lití kovů, Praha, 1955.
- [3] HERMAN, A.: Lití na vytavitelný model. [online], Praha: ČVUT v Praze. Dostupné z: [http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne liti na vytavitelny model.pdf](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne_liti_na_vytavitelny_model.pdf)
- [4] HORÁČEK, M.: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu. [online], Brno. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
- [5] Empepa [online], Česká republika, 2013 Dostupné z http://empepa.net/2012/05/07/krtinske-a-josefovske-udoli/josefov_001/
- [6] KOTEK, K.: Deformace voskových modelů. Praha. Dostupné z: Technické a informační materiály firmy: Prague Casting Services a.s.
- [7] KOBĚRSKÝ, F.: Optimalizace výroby voskových modelu. [online], Brno. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12122/Kobersky František - Bakalářská práce.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12122/Kobersky_František_-_Bakalarska_prace.pdf?sequence=1)
- [8] PRAGUE CASTING SERVICES a.s., Investment Casting Foundry, [online], Praha, Česká republika, Dostupné z: <http://www.praguecast.cz/>
- [9] Technické a informační materiály firmy: PRAGUE CASTING SERVICES a.s., Investment Casting Foundry, Praha, Česká republika
- [10] KRACMAN, O.: Problematika pnutí a deformací voskových modelů pro technologii odlévání na vytavitelný model. Praha. Dostupné z: Technické a informační materiály firmy: Prague Casting Services a.s.
- [11] HORÁČEK, M.: Accuracy of investment casting. [online], Brno: VUT v Brně, 2005. Dostupné z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/2004/accuracy-of-investment-castings.pdf>
- [12] KRACMAN, O.: Faktory ovlivňující přesnost odlitků u metody vytavitelného modelu. [online], Praha: ČVUT v Praze. Dostupné z: http://www.fsid.cvut.cz/cz/u218/stc/Sbornik/S3/Kracman_Ondrej_12133.pdf
- [13] HORÁČEK, M.: Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu, Časopis Slévárenství, č. 1, 2005,



[14] BEELEY, P.R., SMART, R.F.: Investment casting, The Institute of Materials, 2009

[15] MCAE SYSTEMS, s.r.o., [online], Brno, Česká republika, Dostupné z:

<http://www.mcae.cz/3d-skenery>

[16] Technické a informační materiály firmy: MCAE SYSTEMS, s.r.o., Brno, Česká republika

[17] První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s., [online], Velká Bíteš, Česká republika,

Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/>

[18] LBBC Technologies., [online], West Yorkshire, England, Dostupné z:

<http://www.lbbctechologies.com/>

[19] HIRST, R.: Wax testing and design ppt, 2003

[20] Indium corporation [online]. Viscometry. Dostupné z:

<http://blogs.indium.com/blog/ball-attach/0/0/viscometry-101-ball-attach-fluxcone-plate-or-t-bar>

[21] BOND, D., HANCOCK, P.: [online], Dostupné z:

<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl13.pdf>

[22] Fourier transform spectroscopy. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]

Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transform_spectroscopy

8. PŘÍLOHY

1. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 1. ZK a 2. ZK
2. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 3. ZK a 4. ZK
3. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 5. ZK a 6. ZK
4. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 7. ZK a 8. ZK
5. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 9. ZK a 10. ZK
6. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 11. ZK a 12. ZK
7. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 13. ZK a 14. ZK



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24.5.2013

Podpis:



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section § 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24.5.2013

Signature:

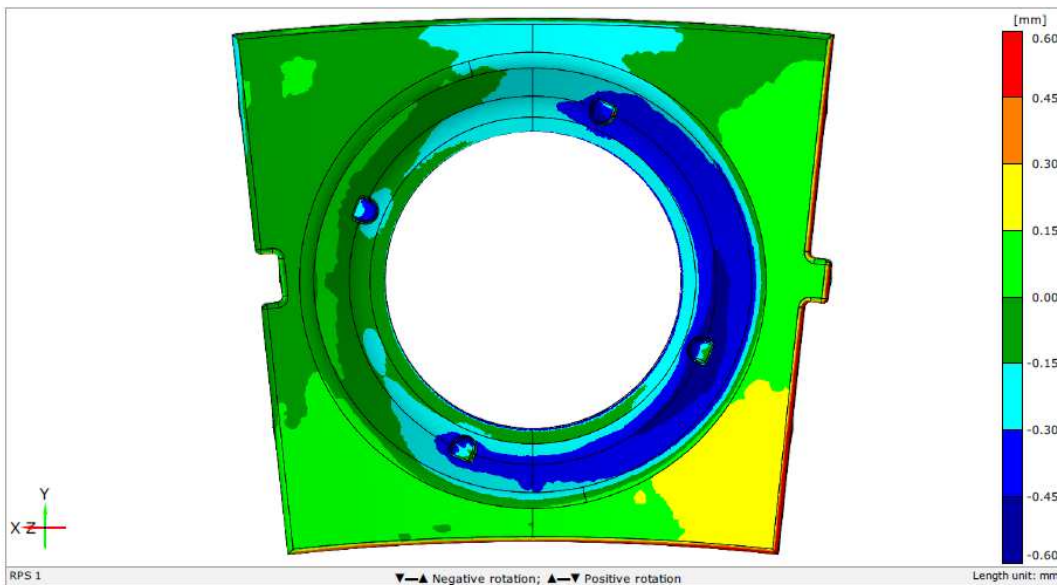


1. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 1. ZK a 2. ZK

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view



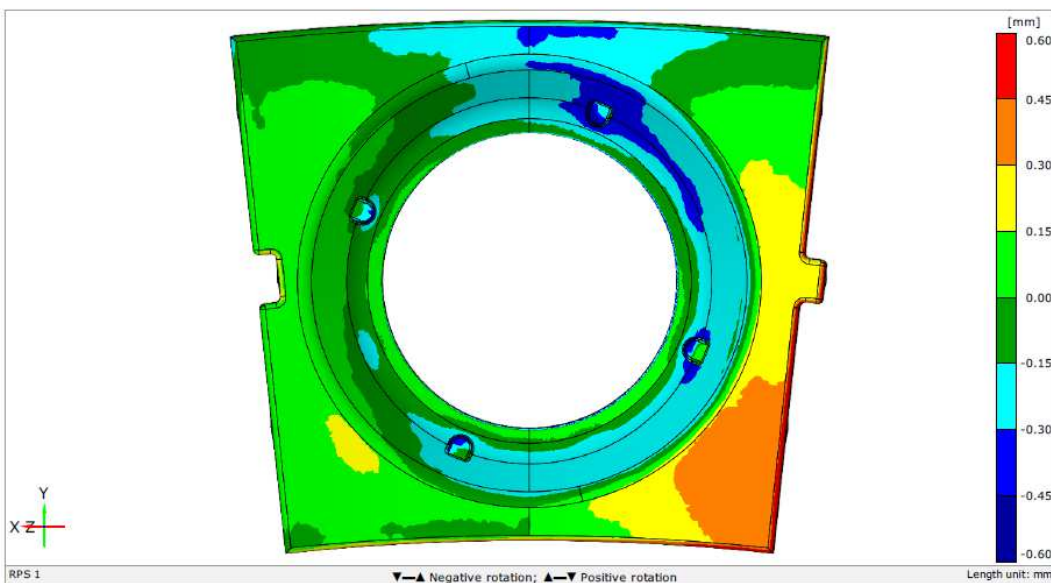
... Wax: 19S12 Professional V7.5 Vosk_1ZK

2/8

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view

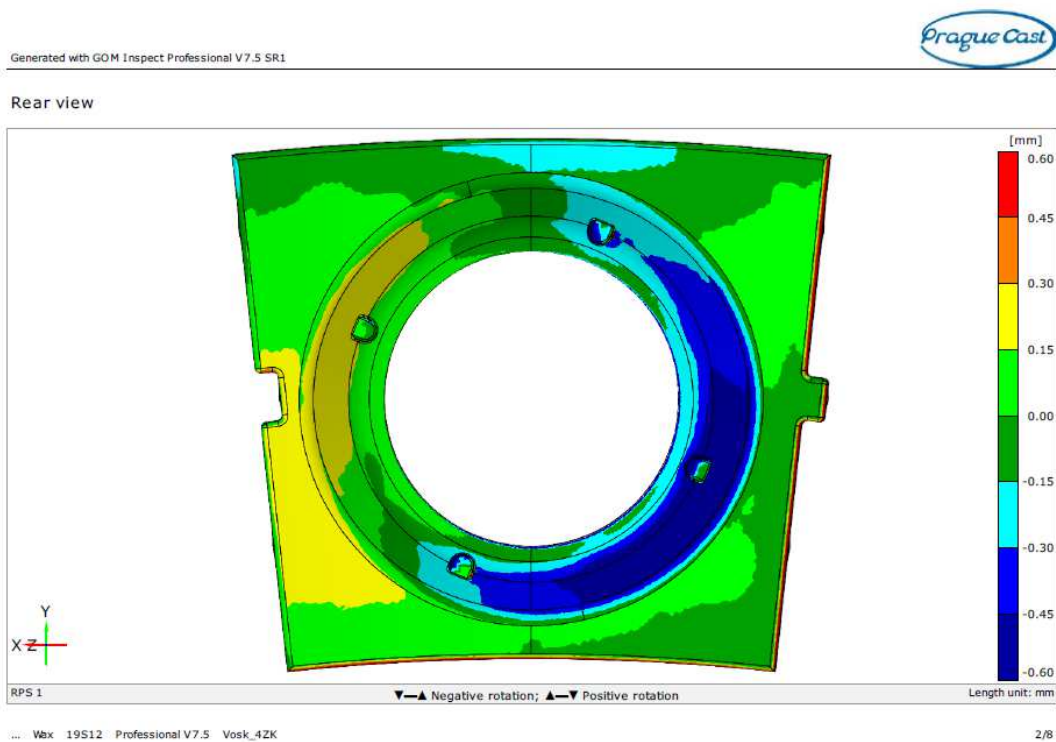
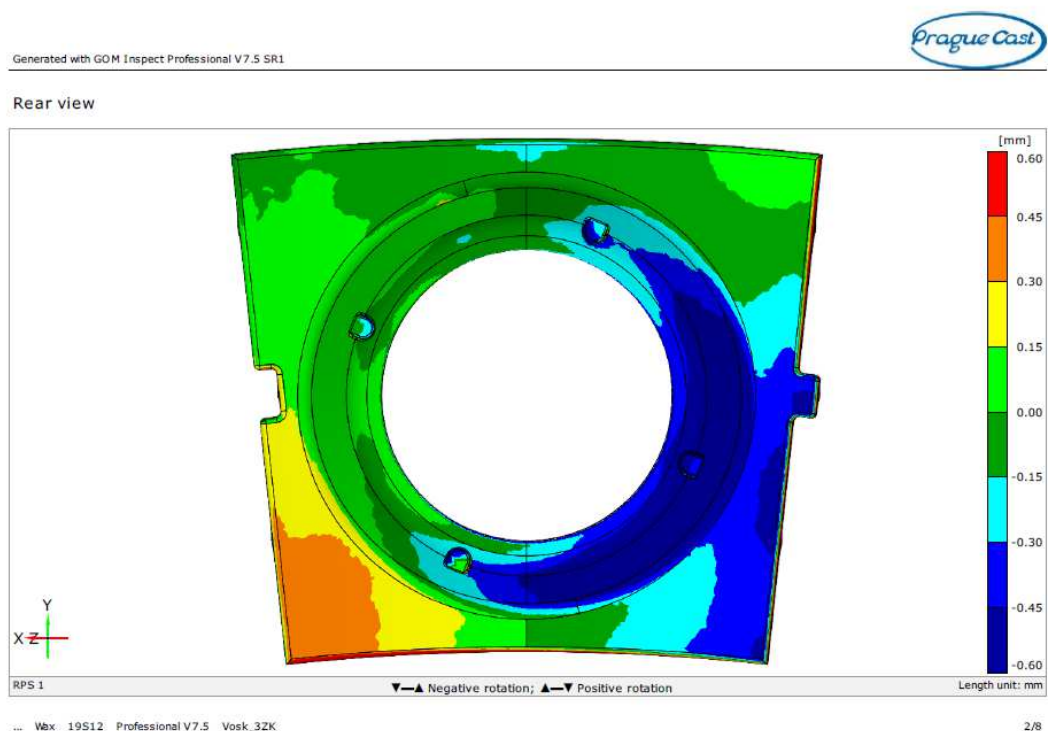


... Wax: 19S12 Professional V7.5 Vosk_2ZK

2/8



2. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 3. ZK a 4. ZK

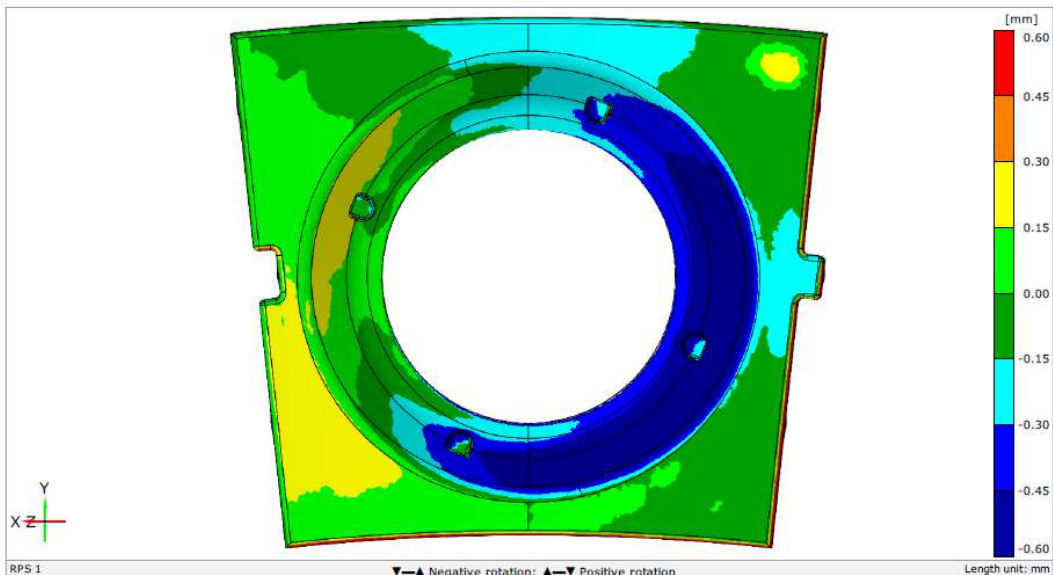


3. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 5. ZK a 6. ZK

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view



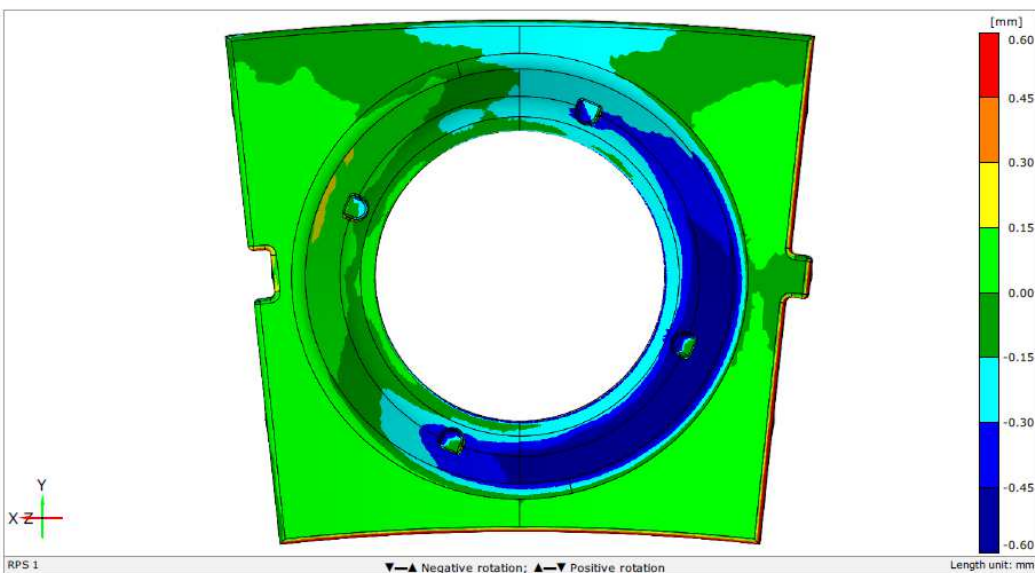
... Wax 19S12 Professional V7.5 Vosk_5ZK

2/8

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view



... Wax 19S12 Professional V7.5 Vosk_6ZK

2/8

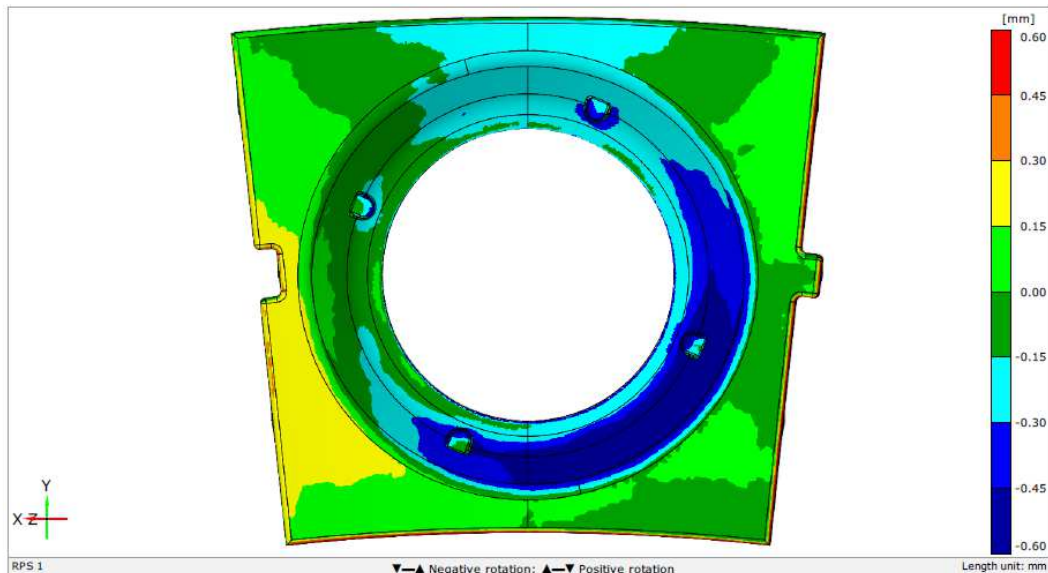


4. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 7. ZK a 8. ZK

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view



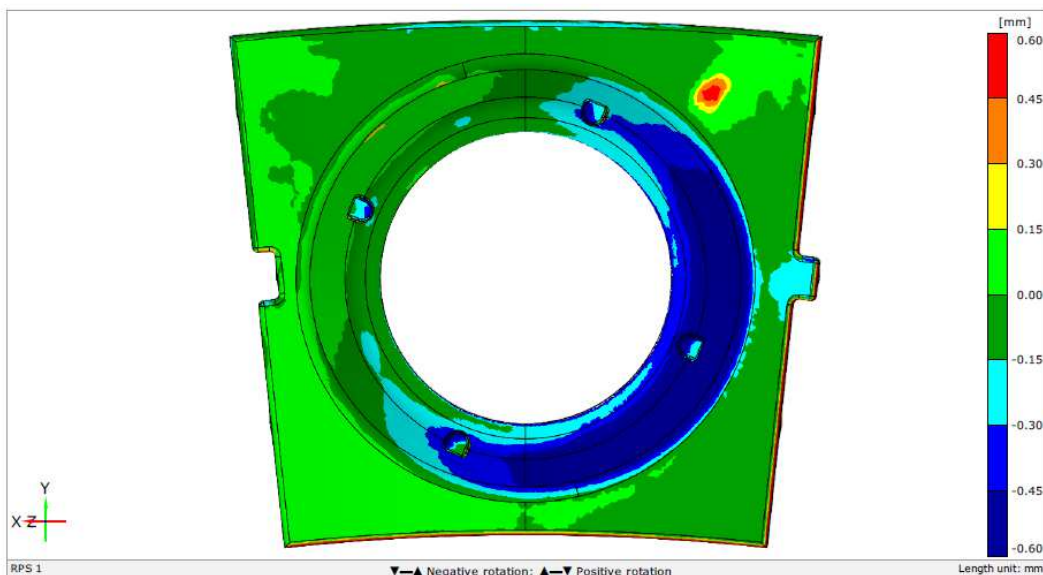
... Wax: 19S12 Professional V7.5 Vosk_7ZK

2/8

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view

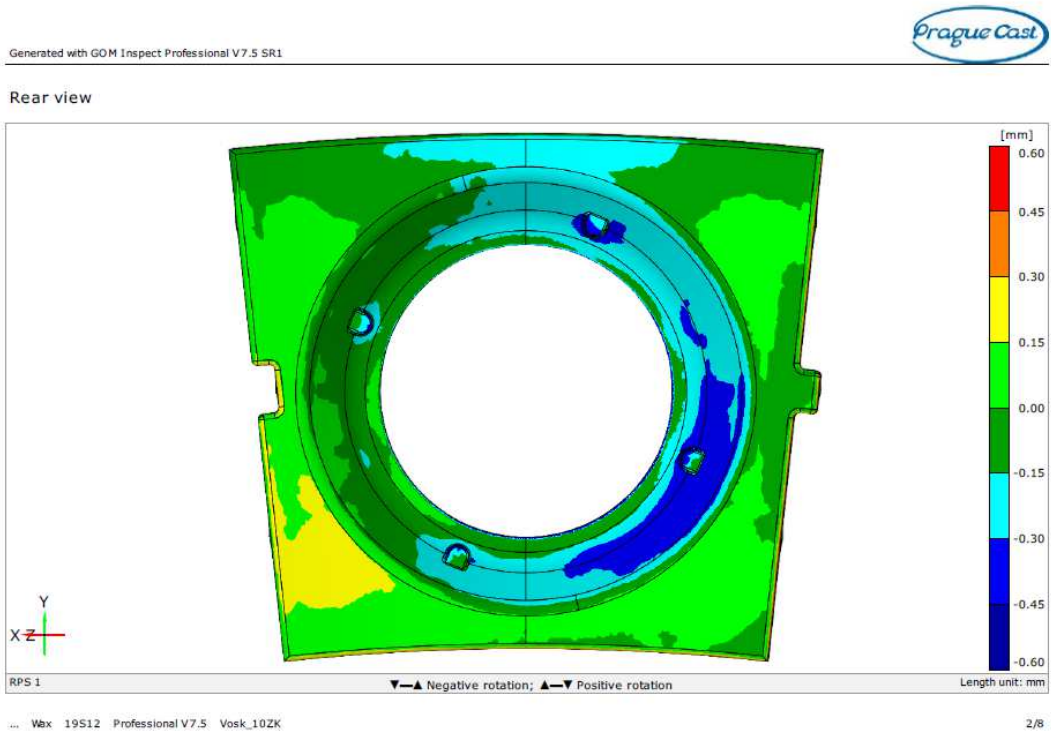
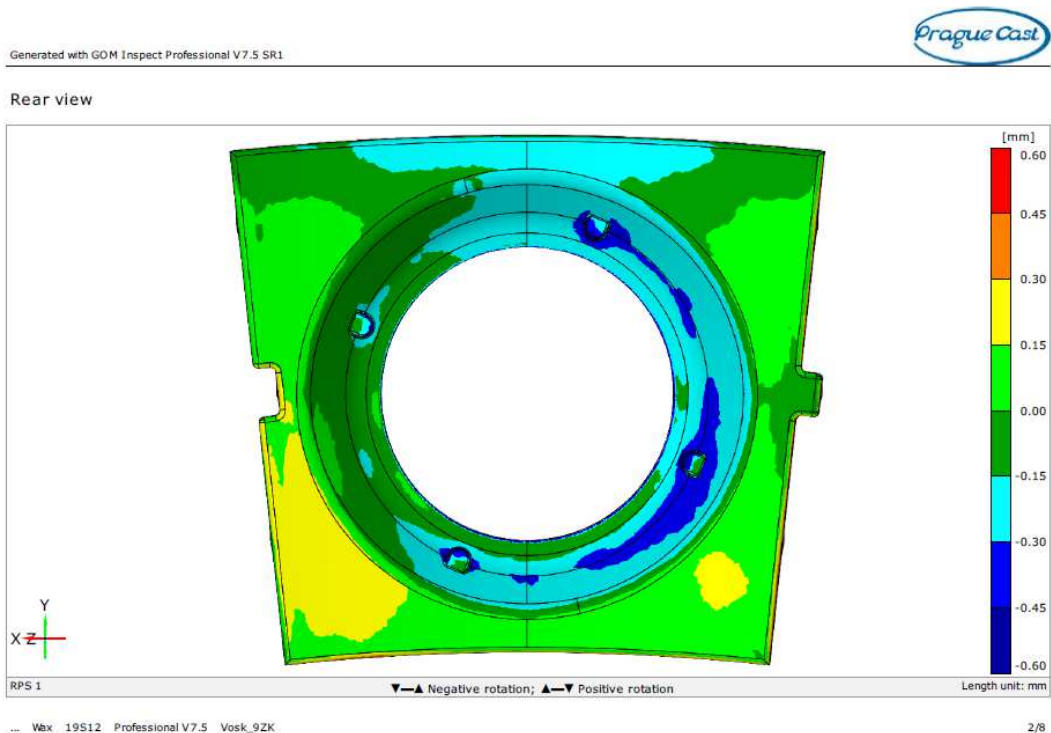


... Wax: 19S12 Professional V7.5 Vosk_8ZK

2/8



5. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 9. ZK a 10. ZK

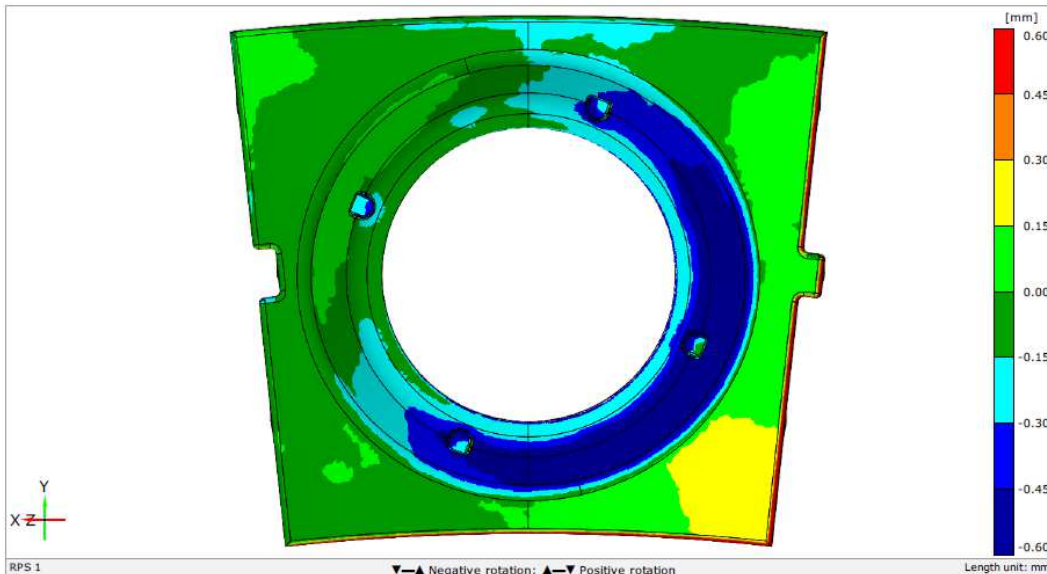


6. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 11. ZK a 12. ZK

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view



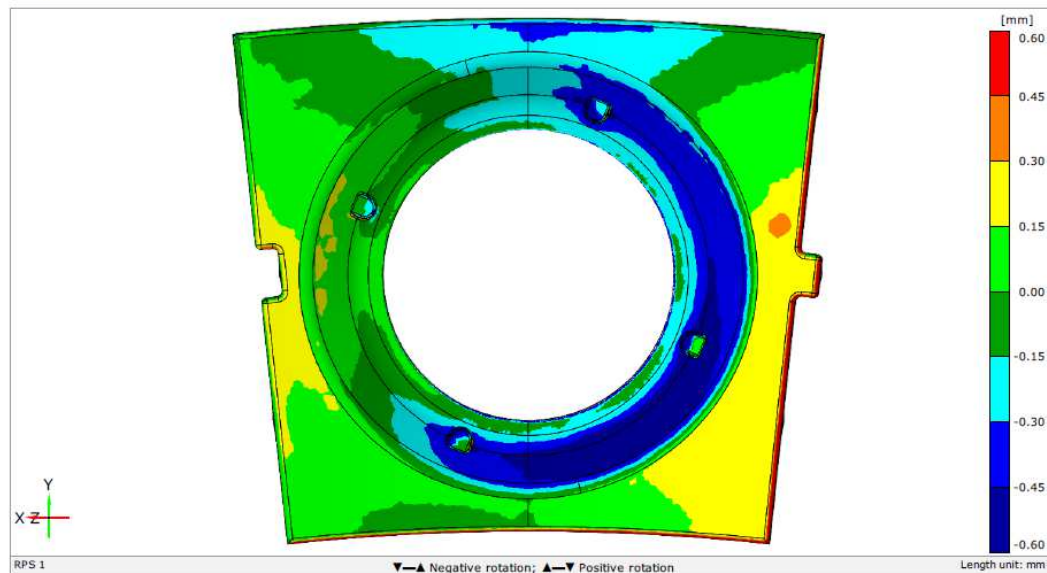
... Wax 19S12 Professional V7.5 Vosk_11ZK

2/8

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view



... Wax 19S12 Professional V7.5 Vosk_12ZK

2/8

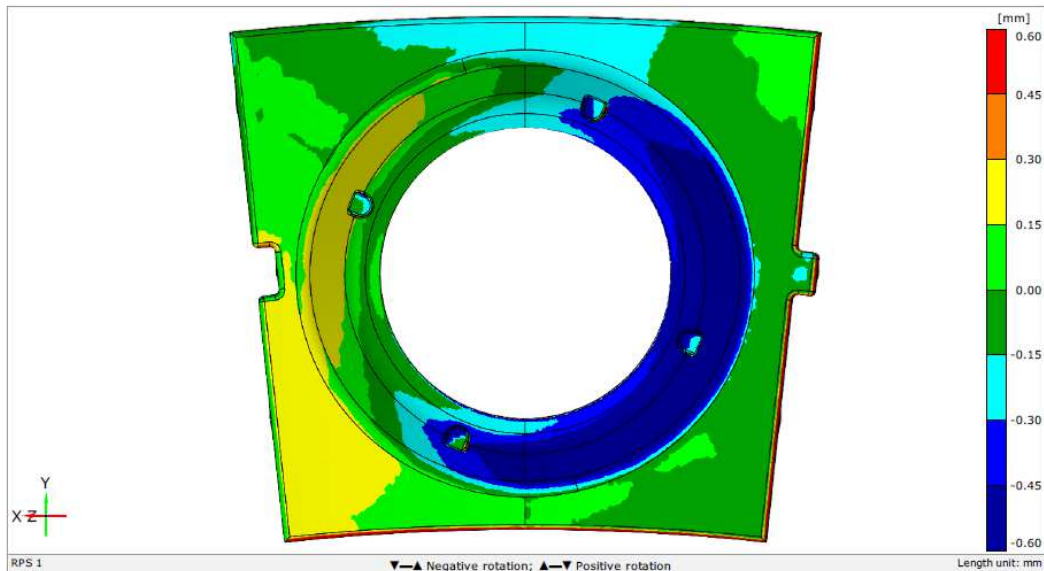


7. Příloha – Barevné mapy voskových modelů tepelného štítu 13. ZK a 14. ZK

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view



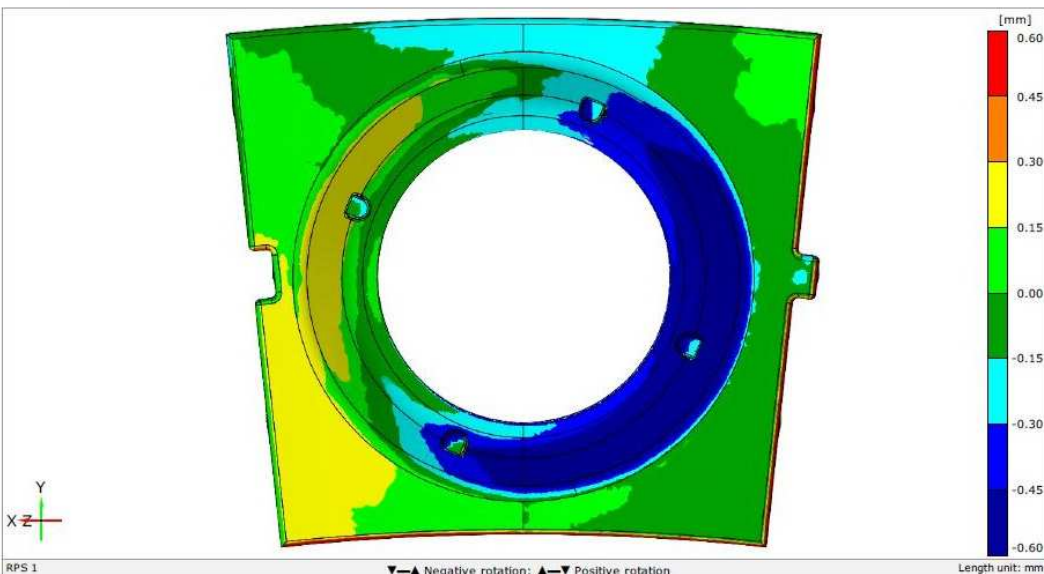
Wax 19S12 Professional V7.5 Vosk_13ZK

2/8

Generated with GOM Inspect Professional V7.5 SR1



Rear view



Wax 19S12 Professional V7.5 Vosk_14ZK

2/8

